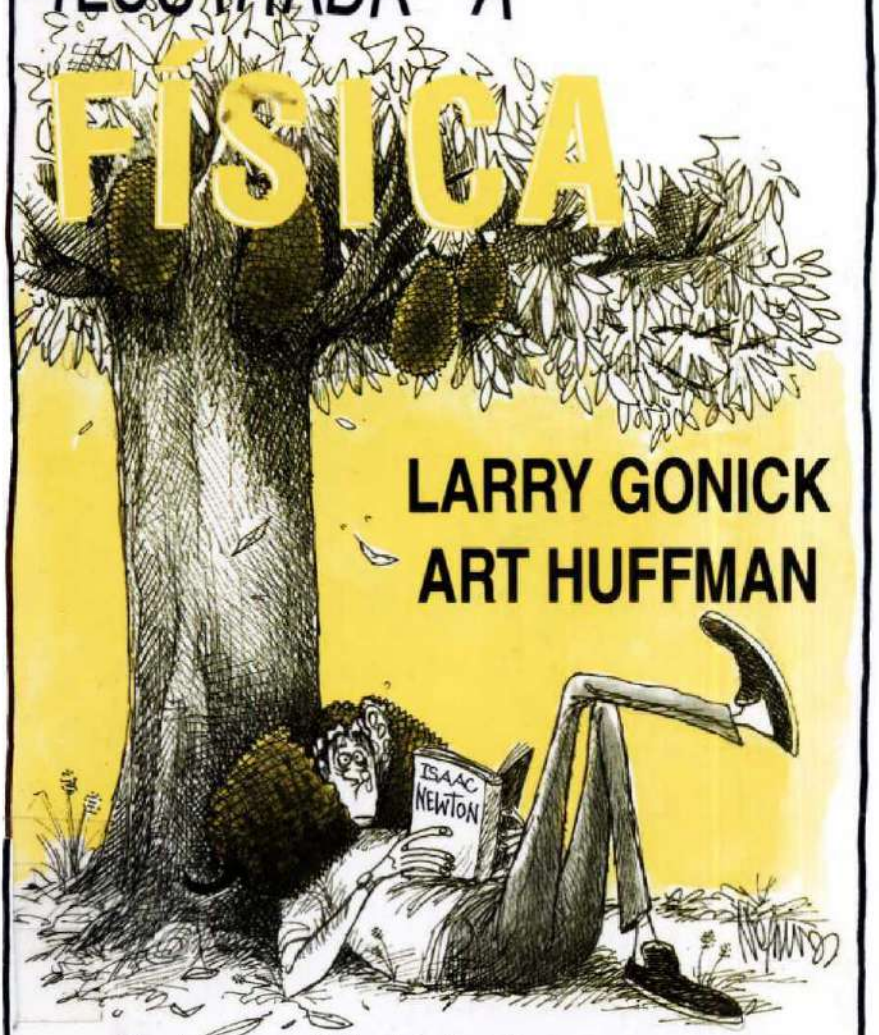
INTRODUÇÃO ILUSTRADA À FÍSICA

editora HARBRA

LARRY GONICK
ART HUFFMAN



Tradução e Adaptação de
LUIS CARLOS DE MENEZES

AGORA FICOU FÁCIL E DIVERTIDO APRENDER!

Finalmente chegou até você a série de livros que, de forma rápida e bem-humorada, simplifica conceitos e populariza temas considerados, por muitos, "difíceis".

Escritos em linguagem coloquial, sob a forma de *cartoons*, os livros

INTRODUÇÃO ILUSTRADA À COMPUTAÇÃO
INTRODUÇÃO ILUSTRADA À ESTATÍSTICA
INTRODUÇÃO ILUSTRADA À FÍSICA
INTRODUÇÃO ILUSTRADA À GENÉTICA

mostram que o aprendizado pode ser feito suavemente e com alegria — afinal, embora os temas sejam *sérios*, não são obrigatoriamente tristes!

Isso acabou! Vá em frente! Descubra as aplicações incríveis que a computação, a estatística, a física e a genética têm na vida das pessoas!

ISBN 85-294-0165-4

editora HARBRA ltda.

INTRODUÇÃO ILUSTRADA À FÍSICA

LARRY GONICK
ART HUFFMAN

Tradução e Adaptação de
LUIS CARLOS DE MENEZES
Físico e Educador
Universidade de São Paulo

editora HARBRA ltda.

DIREÇÃO GERAL: JULIO E. EMÖD
SUPERVISÃO EDITORIAL: MARIA PIA CASTIGLIA
COORDENAÇÃO DE PRODUÇÃO: MARILÚ BERNARDES SÓRIA
COMPOSIÇÃO: AM PRODUÇÕES GRÁFICAS LTDA.
CAPA: NEGREIROS
FOTOLITOS: STAP- STÚDIO GRÁFICO LTDA.
IMPRESSÃO E ACABAMENTO: CROMOSET GRÁFICA E EDITORA LTDA.

INTRODUÇÃO ILUSTRADA À FÍSICA
COPYRIGHT © 1994 POR **EDITORA HARBRA LTDA.**
RUA JOAQUIM TÁVORA, 629, VILA MARIANA, 04015-001 SÃO PAULO, SP
TELEFONES: 549-2244 E 571-0276

TRADUÇÃO DE *THE CARTOON GUIDE TO PHYSICS*
COPYRIGHT © POR LAWRENCE GONICK E ARTHUR HUFFMAN.
PUBLICADO ORIGINALMENTE NOS EUA POR HARPERCOLLINS PUBLISHERS, IN

RESERVADOS TODOS OS DIREITOS. É TERMINANTEMENTE PROIBIDO REPRODUZIR ESTA OBRA, TOTAL OU PARCIALMENTE, POR QUAISQUER MEIOS, SEM AUTORIZAÇÃO EXPRESSA DOS EDITORES.

IMPRESSO NO BRASIL *PRINTED IN BRAZIL*

CONTEÚDO

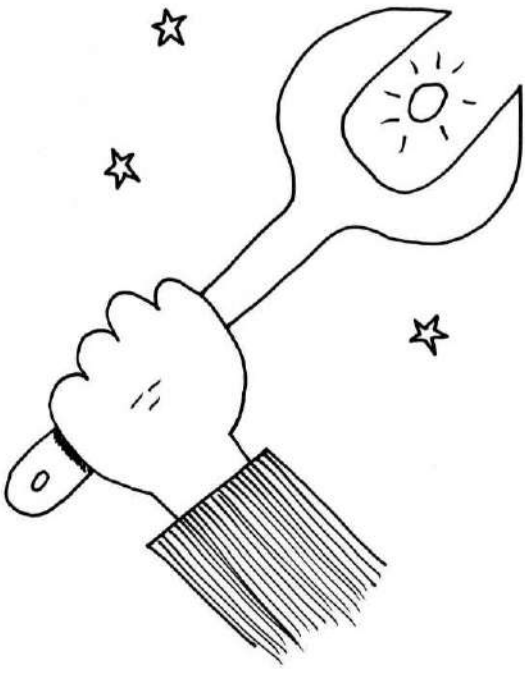
PARTE UM: MECÂNICA

CAPÍTULO 1. MOVIMENTO 3
2. A MAÇÃ E A LUA 18
3. PROJÉTEIS 33
4. MOVIMENTO DOS SATÉLITES E AUSÊNCIA DE PESO 37
5. OUTRAS ÓRBITAS 42
6. TERCEIRA LEI DE NEWTON 47
7. MAIS SOBRE FORÇAS 53
8. QUANTIDADE DE MOVIMENTO E IMPULSO 64
9. ENERGIA 73
10. COLISÕES 83
11. ROTAÇÃO 90

PARTE DOIS: ELETRICIDADE E MAGNETISMO

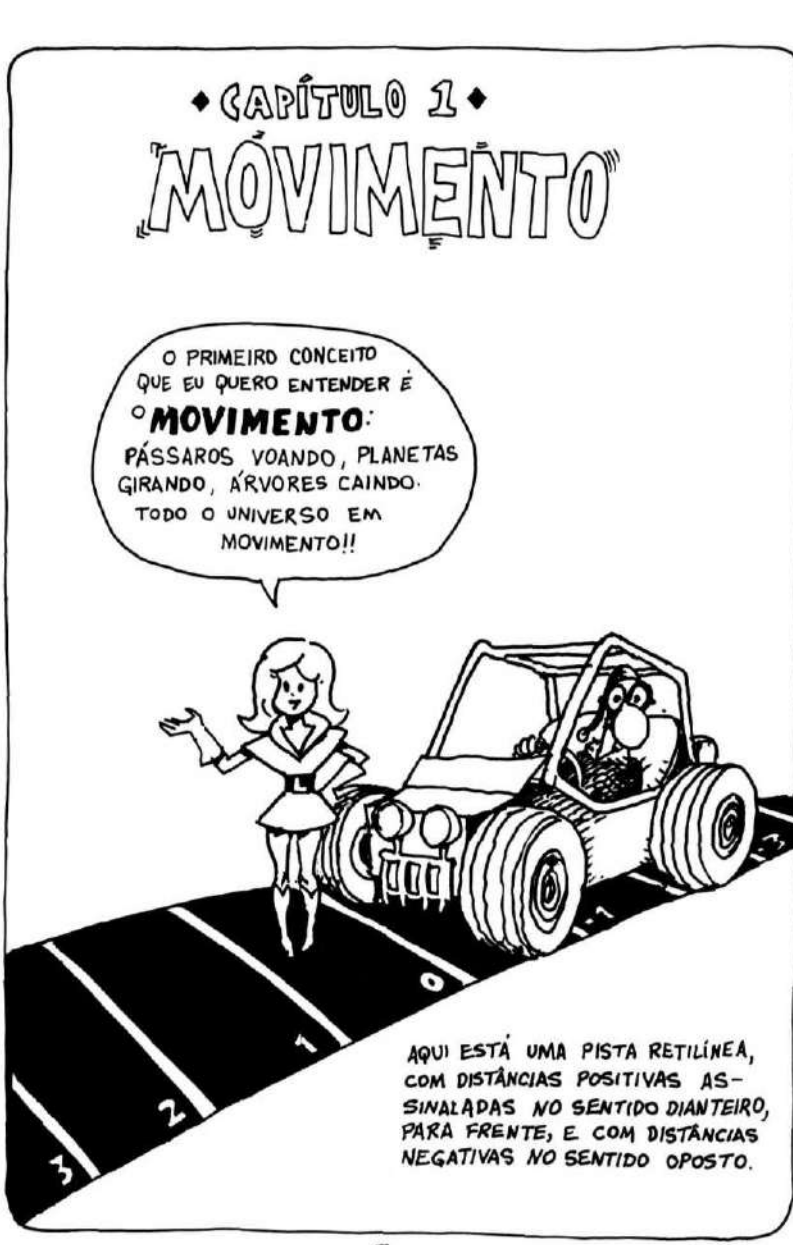
CAPÍTULO 12. CARGA 105
13. CAMPOS ELÉTRICOS 117
14. CAPACITORES 123
15. CORRENTES ELÉTRICAS 128
16. SÉRIE E PARALELO 142
17. CAMPOS MAGNÉTICOS 149
18. ÍMÃS PERMANENTES 160
19. INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA 164
20. RELATIVIDADE 169
21. INDUTORES 177
22. CORRENTE CONTÍNUA E CORRENTE ALTERNADA 180
23. EQUAÇÕES DE MAXWELL E LUZ 189
24. ELETRODINÂMICA QUÂNTICA 195

• PARTE UM •
MECÂNICA



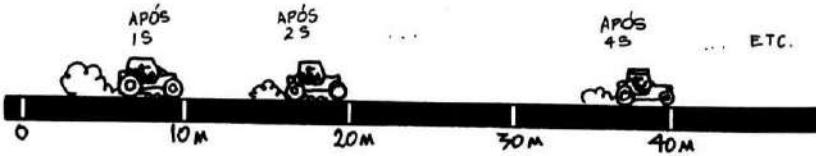
◆ CAPÍTULO 1 ◆

MOVIMENTO


O PRIMEIRO CONCEITO QUE EU QUERO ENTENDER É O MOVIMENTO: PÁSSAROS VOANDO, PLANETAS GIRANDO, ÁRVORES CAINDO. TODO O UNIVERSO EM MOVIMENTO!!
3
2
1
0
-1
AQUI ESTÁ UMA PISTA RETILÍNEA, COM DISTÂNCIAS POSITIVAS ASSINALADAS NO SENTIDO DIANTEIRO, PARA FRENTE, E COM DISTÂNCIAS NEGATIVAS NO SENTIDO OPOSTO.

OBSERVEMOS **RINGO**, MEU AMIGO ASTRONAUTA, ENQUANTO ELE DIRIGE UM CARRO NESTA PISTA. O CARRO SE MOVE COM VELOCIDADE CONSTANTE, POIS ELE PERCORRE DISTÂNCIAS IGUAIS EM INTERVALOS DE TEMPO IGUAIS, E PODEMOS ESCREVER:

$$d = v \cdot t$$



A DISTÂNCIA **d** É IGUAL À VELOCIDADE **v** VEZES O TEMPO **t**. SE A VELOCIDADE É $10\,m/s$ (DEZ METROS POR SEGUNDO), ENTÃO A CADA SEGUNDO RINGO PERCORRE 10 METROS, EM DOIS SEGUNDOS SERIAM 20 METROS, EM TRÊS SEGUNDOS 30 METROS, EM UM MINUTO 600 METROS.

E EM UMA HORA (3.600S) ELE ANDARIA

$3.600\,s \times 10\,m/s = 36{,}000\,m =$

36 km.

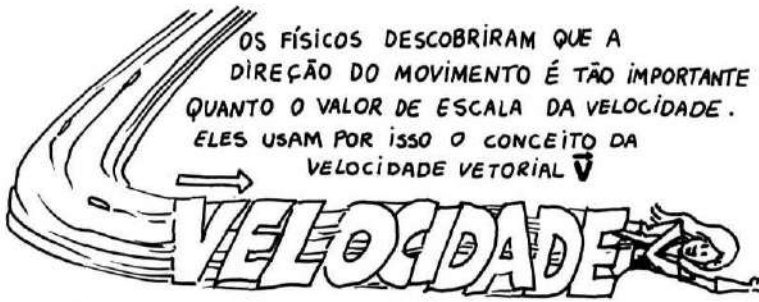
EM UMA VIAGEM COMUM, A GENTE FICA O TEMPO TODO ACELERANDO (AUMENTANDO A VELOCIDADE) OU FREIANDO (DIMINUINDO A VELOCIDADE); OU SEJA, A VELOCIDADE NÃO É CONSTANTE. COMO FICA, ENTÃO, A EQUAÇÃO $d = v.t$? SE V ESTÁ MUDANDO, QUAL VALOR DE V A GENTE DEVE USAR?

A GENTE PODERIA RESOLVER A EQUAÇÃO PARA V, OBTENDO $V = d/t$, OU SEJA

$$V = \frac{(\text{LEITURA FINAL DO ODÔMETRO}) - (\text{LEITURA INICIAL DO ODÔMETRO})}{(\text{TEMPO TRANSCORRIDO})}$$

ISTO DÁ A **VELOCIDADE MÉDIA** PARA A VIAJEM. OS VELHOS FILÓSOFOS DA NATUREZA DEMORARAM PARA PERCEBER QUE EXISTE UMA **VELOCIDADE INSTANTÂNEA** QUE É AQUELA MOSTRADA A CADA INSTANTE NO VELOCÍMETRO.*

* **N. do T.:** NO TEMPO DOS MENCIONADOS FILÓSOFOS NÃO HAVIA VELOCÍMETROS...

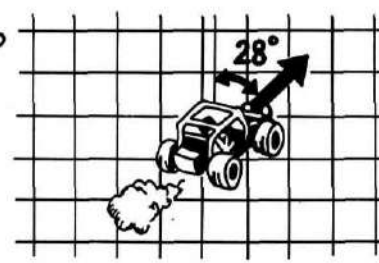

OS FÍSICOS DESCOBRIRAM QUE A DIREÇÃO DO MOVIMENTO É TÃO IMPORTANTE QUANTO O VALOR DE ESCALA DA VELOCIDADE. ELES USAM POR ISSO O CONCEITO DA VELOCIDADE VETORIAL $\vec{V}$
VELOCIDADE

PARA REPRESENTAR DIREÇÃO E SENTIDO JUNTO COM O VALOR NUMÉRICO (VELOCIDADE ESCALAR).

SE RINGO ANDA NA DIREÇÃO NEGATIVA, DANDO RÉ OU MEIA-VOLTA, DIZEMOS QUE SUA VELOCIDADE É **NEGATIVA**

PODE-SE PENSAR NA VELOCIDADE VETORIAL ($\vec{V}$) COMO SENDO UMA FLECHA NA DIREÇÃO E NO SENTIDO DO MOVIMENTO, CUJO COMPRIMENTO É PROPORCIONAL À RAPIDEZ, OU SEJA, AO "TAMANHO" DA VELOCIDADE.

QUALQUER QUE SEJA A DIREÇÃO EM QUE RINGO DIRIJA SEU CARRO, SUA VELOCIDADE VETORIAL SERÁ EXPRESSA POR UMA FLECHA. POR EXEMPLO $\vec{V} = (32\ m/s, A\ 28°$ NORTE - NORDESTE).



QUANDO A VELOCIDADE DE UM OBJETO VARIA, DIZEMOS QUE ELE ESTÁ

ACELERADO

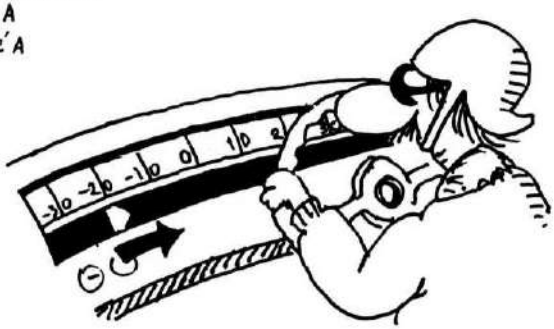
DEFINIMOS ACELERAÇÃO COMO VARIAÇÃO DA VELOCIDADE POR UNIDADE DE TEMPO:

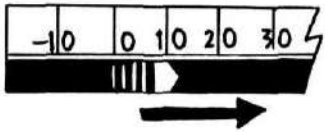
$$a = \frac{v}{t}$$

ISSO É SEMELHANTE À DEFINIÇÃO DA VELOCIDADE COMO VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA POR UNIDADE DE TEMPO.

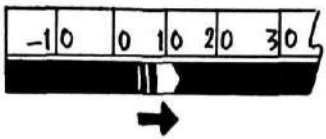
VEJAMOS OUTRA VEZ O PAINEL DO CARRO DO RINGO COM SEU "VELOCÍMETRO RELATIVO" QUE TEM NÚMEROS NEGATIVOS PARA A MARCHA À RÉ.

NOTEMOS QUE A ACELERAÇÃO É A VELOCIDADE NOMINAL DO PONTEIRO QUE INDICA A VELOCIDADE!!

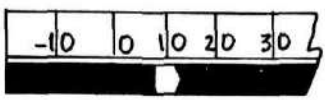




SE A VELOCIDADE MUDA RAPIDAMENTE, É GRANDE A ACELERAÇÃO.

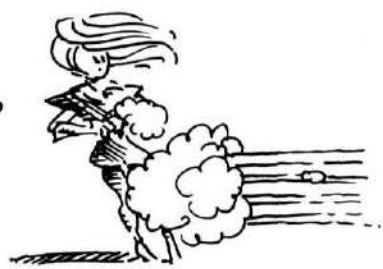


SE A VELOCIDADE MUDA DEVAGAR, A ACELERAÇÃO É PEQUENA.



SE RINGO MANTÉM CONSTANTE A VELOCIDADE, A ACELERAÇÃO É ZERO.

SE RINGO ACELERAR CONTINUAMENTE DE 0 A 50 Km/h EM 5 s, DE FORMA QUE O PONTEIRO DO VELOCÍMETRO SE MOVA COM **VELOCIDADE CONSTANTE**, ENTÃO A **ACELERAÇÃO É CONSTANTE** E PODEMOS CALCULÁ-LA:



$$a = \frac{\text{VELOCIDADE FINAL} - \text{VELOCIDADE INICIAL}}{\text{TEMPO TRANSCORRIDO}} = \frac{50\,Km/h}{5\,s}$$

$$= \frac{50\,Km/h}{5\,s} \times \left(\frac{1\,h}{3600\,s}\right)\left(\frac{1000\,m}{1\,Km}\right) = 13{,}89\,m/s^2$$

ESTES FATORES CONVERTEM RESPECTIVAMENTE HORAS EM SEGUNDOS E QUILÔMETROS EM METROS.

NOTE QUE A UNIDADE DE ACELERAÇÃO É M/s^2 (METRO POR SEGUNDO AO QUADRADO, OU SEJA, METRO POR SEGUNDO, POR SEGUNDO!).

VOCÊ NOTA OUTRO EFEITO QUANDO RINGO ACELERA? QUANDO O CARRO É ACELERADO PARA A FRENTE RINGO SE SENTE APERTADO CONTRA O ENCOSTO DO BANCO.

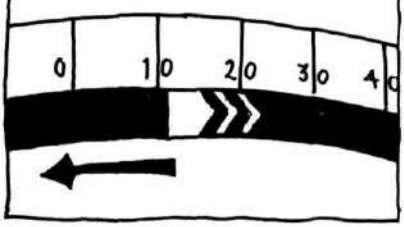
EM GERAL, AS FORÇAS ESTÃO ASSOCIADAS COM A ACELERAÇÃO!

AGORA RINGO ACIONA OS FREIOS.

DEVERIAM ESTAR EM ALGUM LUGAR AQUI EMBAIXO...

O CARRO VAI PARANDO E RINGO É PROJETADO PARA A FRENTE.

NESSA FRENAGEM, OU SITUAÇÃO DE **DESACELERAÇÃO**, O PONTEIRO DO VELOCÍMETRO MOVE PARA A ESQUERDA, ISTO É, A VELOCIDADE É NEGATIVA.



OU SEJA, O CARRO TEM ACELERAÇÃO NEGATIVA QUANDO É FREIADO.

BRRRUUUM...

PERCEBEU QUE A ACELERAÇÃO DO CARRO É OPOSTA A AÇÃO QUE VOCÊ "SENTIU"?

PERCEBI ATÉ DEMAIS...

O CARRO TEM ACELERAÇÃO NEGATIVA QUANDO SUA VELOCIDADE POSITIVA É DIMINUÍDA OU QUANDO SUA VELOCIDADE NEGATIVA É AMPLIADA, OU SEJA, É ACELERADO NA DIREÇÃO NEGATIVA.

EM AMBOS OS CASOS, O PONTEIRO SE MOVE PARA A ESQUERDA!

PODEMOS USAR AS "FORÇAS QUE SENTIMOS" NO CARRO ACELERADO PARA CONSTRUIR UM INDICADOR DE ACELERAÇÃO – UM **ACELERÔMETRO**. SIMPLESMENTE PENDURAMOS UMA MASSA POR UM FIO NA BARRA DA CAPOTA.

QUANDO ELE ACELERA O CARRO PARA A FRENTE, A MASSA VEM COM O FIO PARA TRÁS, FAZENDO UM ÂNGULO COM A VERTICAL.

QUANDO A ACELERAÇÃO É NEGATIVA, O FIO SE DESLOCA, FORMANDO UM ÂNGULO PARA A FRENTE.

A MASSA SE MOVE EM SENTIDO OPOSTO À ACELERAÇÃO DO CARRO, E O ÂNGULO DÁ UMA MEDIDA DESSA ACELERAÇÃO.

A

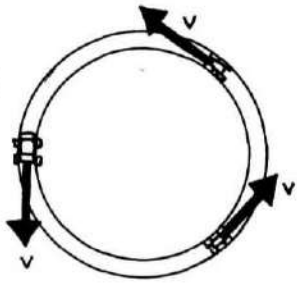
$a = g \tan A$

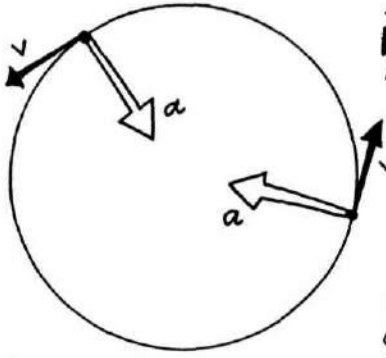
(QUE SERÁ g? VEJA ADIANTE!)

ESTA É UMA SITUAÇÃO DIFERENTE DA ACELERAÇÃO: RINGO DIRIGE COM VELOCIDADE CONSTANTE DE 20 KM/H NUM TRAJETO CIRCULAR.

APESAR DE O VELOCÍMETRO NÃO ESTAR MUDANDO, RINGO "SENTE UMA FORÇA" QUE O EMPURRA PARA FORA E O ACELERÔMETRO FAZ UM ÂNGULO PARA FORA DO CURVA.

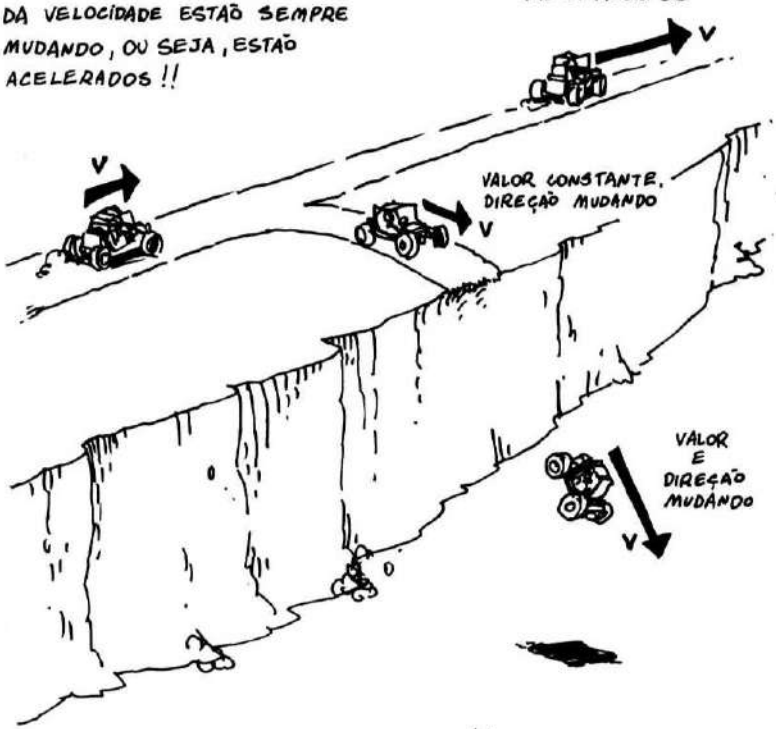
NESSE CASO, A ACELERAÇÃO **NÃO** É DADA PELA VELOCIDADE DO PONTEIRO DO VELOCÍMETRO. ACONTECE QUE, MESMO QUE A "RAPIDEZ" NÃO ESTEJA MUDANDO, A VELOCIDADE VETORIAL ESTÁ SE ALTERANDO...





...E TEMOS UMA ACELERAÇÃO **PERPENDICULAR** AO MOVIMENTO, NO SENTIDO OPOSTO À "FORÇA QUE RINGO SENTE". O ACELERÔMETRO INDICA CORRETAMENTE A ACELERAÇÃO: QUANDO UM OBJETO SE MOVE NUM CÍRCULO, SEM MUDAR O VALOR DA VELOCIDADE, SUA ACELERAÇÃO APONTA PARA O **CENTRO DO CÍRCULO**, MUDANDO CONSTANTEMENTE A DIREÇÃO DA VELOCIDADE.

ACELERAÇÃO NÃO É UM CONCEITO FÁCIL, MAS É FUNDAMENTAL NA FÍSICA. A MAIOR PARTE DOS MOVIMENTOS NÃO É SIMPLES: O VALOR E A DIREÇÃO DA VELOCIDADE ESTÃO SEMPRE MUDANDO, OU SEJA, ESTÃO ACELERADOS!!

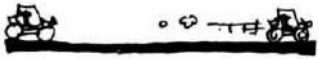


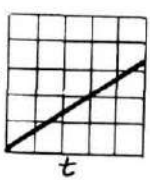
VELOCIDADE É A TAXA DE VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA. ACELERAÇÃO É A TAXA DE VARIAÇÃO DA VELOCIDADE. A PRÓPRIA ACELERAÇÃO PODE ESTAR VARIANDO.

GERALMENTE, EM FÍSICA BÁSICA, SÓ LIDAMOS COM SITUAÇÕES ONDE A

ACELERAÇÃO É CONSTANTE.

SUPONHA QUE VOCÊ PARTA DO REPOUSO E RECEBA ACELERAÇÃO CONSTANTE **a** POR UM PERÍODO **t**. QUANTO VOCÊ PERCORRE NESSE TEMPO?





POIS BEM, SUA VELOCIDADE INICIAL É ZERO E ELA CRESCE UNIFORMEMENTE ATÉ **V=at** SUA VELOCIDADE **MÉDIA** NESSE INTERVALO FOI:

$$V_{MÉDIA} = \frac{0+at}{2} = \frac{1}{2}at$$

ENTÃO, A DISTÂNCIA PERCORRIDA **d** É A VELOCIDADE MÉDIA VEZES O TEMPO, OU SEJA,

$$d = \frac{1}{2}at \cdot t$$

$$d = \frac{1}{2}at^2$$

POR EXEMPLO, SUPONHA QUE O RINGO ACELERE DE 0 A 50 KM/H EM 5s; QUANTO TERÁ ANDADO? PRIMEIRO TERÍAMOS QUE CALCULAR A ACELERAÇÃO, MAS NÓS JÁ A CALCULAMOS ANTES $a = 13,89\ M/s^2$. ASSIM:

$$d = \frac{1}{2}at^2$$

$$= \frac{1}{2}(13,89\ M/s^2)\cdot(5s)$$

$$= 173,6 \text{ METROS}$$

A QUEDA

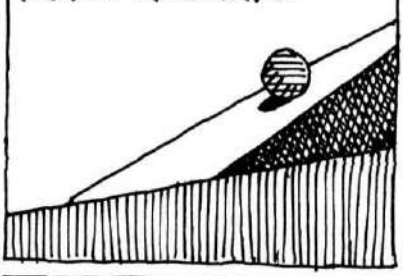
É OUTRA FORMA FREQÜENTE DE MOVIMENTO.

DEIXE CAIR ALGO; ESTE LIVRO, POR EXEMPLO. SUA VELOCIDADE SERÁ CONSTANTE? TALVEZ TUDO SEJA TÃO RÁPIDO QUE NEM DÁ PRA DIZER.

GALILEU

(1564-1642) TAMBÉM ANDOU PENSANDO NESTA QUESTÃO.

GALILEU ACHOU UMA FORMA DE TORNAR A QUEDA MAIS LENTA, USANDO UM "APARELHO" CHAMADO **PLANO INCLINADO.**



GALILEU ROLOU VÁRIOS OBJETOS PLANO INCLINADO ABAIXO, USANDO COMO CRONÔMETRO SEU PRÓPRIO PULSO.

COMO É QUE A GENTE SABE QUE ROLAR PLANO ABAIXO É COMO CAIR, SÓ QUE MAIS DEVAGAR? AH! O GÊNIO DE GALILEU!! VÁ AUMENTANDO A INCLINAÇÃO ATÉ QUE VIRE QUEDA LIVRE!

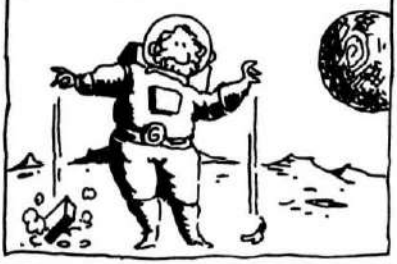
GALILEU DESCOBRIU QUE A DISTÂNCIA ROLADA PELA BOLA CRESCE COM O QUADRADO DO TEMPO. OU SEJA...

$$d = \frac{1}{2}at^2$$

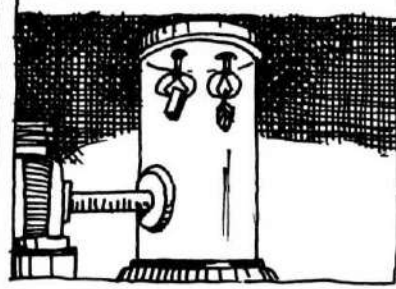
GALILEU TAMBÉM SE QUESTIONAVA SOBRE COMO A VELOCIDADE DE QUEDA SERIA AFETADA PELA **MASSA**. "TODO MUNDO SABE QUE UM TIJOLO CAI MAIS RÁPIDO QUE UMA PENA".

ACONTECE QUE OS EXPERIMENTOS DE GALILEU RESULTARAM NUMA SURPRESA: DESPREZADA A RESISTÊNCIA DO AR,

UMA PENA É BASTANTE RETIDA PELA RESISTÊNCIA DO AR E, EM GERAL, CAI TREMULANDO DEVAGAR, MAS NO VÁCUO, COMO NA LUA, CAIRIA COMO UM TIJOLO.



PODEMOS REPETIR A EXPERIÊNCIA NA TERRA, NUM RECIPIENTE DO QUAL SE BOMBEOU O AR PARA FORA.

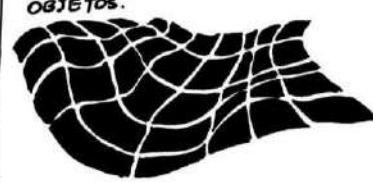


MEDIDAS CAUTELOSAS DETERMINARAM QUE A ACELERAÇÃO COM QUE QUALQUER OBJETO CAI, NA PROXIMIDADE DA TERRA, É

$$g = 9{,}8\ m/s^2$$

(DESPREZANDO A RESISTÊNCIA DO AR).

POR FALAR NISSO, **EINSTEIN** [1879-1955] CONCLUIU QUE SE TODOS OS OBJETOS SE MOVEM DA MESMA FORMA NUM CAMPO GRAVITACIONAL, ENTÃO A GRAVIDADE DEVE SER UMA PROPRIEDADE DO **ESPAÇO** E DO **TEMPO** AO INVÉS DE SER ALGO DOS PRÓPRIOS OBJETOS.



TORNEMOS ISSO MAIS CONCRETO, LARGANDO UM BLOCO DE CONCRETO... DE CIMA DO TELHADO.

SERÁ UM MOVIMENTO COM ACELERAÇÃO g CONSTANTE, DE FORMA QUE A VELOCIDADE CRESCE PROPORCIONALMENTE AO TEMPO:

$$v = g \cdot t$$

APÓS 1 s DE QUEDA, A VELOCIDADE SERÁ

$9{,}8\ m/s^2 \times 1\ s = 9{,}8\ m/s$

APÓS 2 s, SERÁ

$9{,}8\ m/s^2 \times 2\ s = 19{,}6\ m/s$ ETC...

PRA CALCULAR QUANTO É A QUEDA NO TEMPO t, BASTA USAR A FÓRMULA

$$d = \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

APÓS 1 s, TERÁ CAÍDO

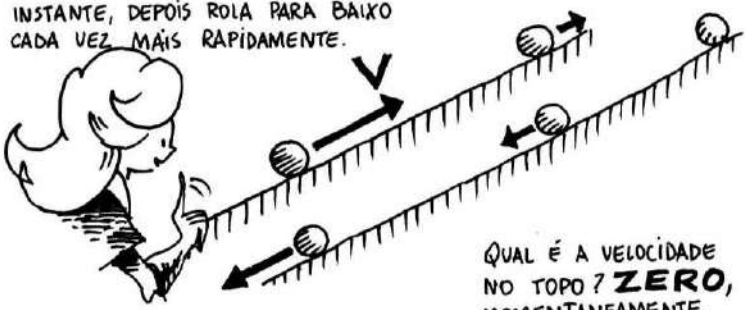
$\frac{1}{2}(9{,}8\ m/s^2) \cdot (1\ s) = 4{,}9\ m$

APÓS 2 s A DISTÂNCIA PERCORRIDA SERÁ

$\frac{1}{2}(9{,}8\ m/s^2) \cdot (2\ s) = 19{,}6\ m$

t	v	d
0	0	0
0,5	4,9 m/s	1,3 m
1	9,8 m/s	4,9 m
2	19,6 m/s	19,6 m
3	29,4 m/s	44,1 m
4	39,2 m/s	78,4 m

JOGUEMOS AGORA UMA BOLA LADEIRA ACIMA, NO "APARELHO DE DILUIR GRAVIDADE" DE GALILEU: A BOLA COMEÇA RÁPIDO, DIMINUI, PÁRA UM INSTANTE, DEPOIS ROLA PARA BAIXO CADA VEZ MAIS RAPIDAMENTE.



QUAL É A VELOCIDADE NO TOPO? **ZERO**, MOMENTANEAMENTE.

MAS QUAL SERIA A **ACELERAÇÃO** NO TOPO? NÃO É ZERO! A ACELERAÇÃO É CONSTANTE TODO O TEMPO. A ACELERAÇÃO DIMINUI A VELOCIDADE NA SUBIDA E A AUMENTA NA DESCIDA. ANALOGAMENTE, A PEDRA JOGADA PARA CIMA TEM, O TEMPO TODO, ACELERAÇÃO **g** APONTANDO ***PARA BAIXO***.

o CAPÍTULO 2 o
A MAÇÃ E A LUA

PARA COMPREENDER O MOVIMENTO DA LUA E TODOS OS OUTROS MOVIMENTOS À NOSSA VOLTA, PRIMEIRO FAZEMOS A PERGUNTA: O QUE ACONTECE COM OS OBJETOS QUANDO **NÃO** SUBMETIDOS A NENHUMA FORÇA?

DURANTE SÉCULOS, A FÍSICA DEITOU-SE À SOMBRA DE

ARISTÓTELES

(384 - 322 A.C.).

ELE ACREDITAVA QUE O MOVIMENTO "NATURAL" DOS OBJETOS **CELESTES** (LUA, ESTRELAS) DEVERIA SER CIRCULAR, ENQUANTO OS OBJETOS **TERRESTRES** (MAÇÃ, PEDRAS, VOCÊ) DEVERIAM TENDER A **CAIR.**

NOTE QUE SE A LUA SE MOVE NATURALMENTE EM UM CÍRCULO, NÃO PRECISAMOS DE GRAVIDADE PARA EXPLICAR SEU MOVIMENTO.
É SIMPLESMENTE "NATURAL"
QUANTO AOS OBJETOS TERRESTRES, ARISTÓTELES PENSAVA QUE ELES, DEPOIS DE CAÍREM, FICARIAM EM REPOUSO, A MENOS QUE ALGUMA FORÇA OS DESLOCASSE.
AINDA NÃO SE MEXEU!
E NÓS INTUITIVAMENTE CONCORDAMOS COM ELE! PARECE QUE UMA FORÇA É NECESSÁRIA PARA MANTER MOVIMENTOS COMO O MOTOR PARA IMPELIR UM CARRO.
ROAR
QUANDO O MOTOR É DESLIGADO, O CARRO GRADUALMENTE... RODA ... ATÉ... PARAR...
PUF... PUF... PUF... PUF... PUF...

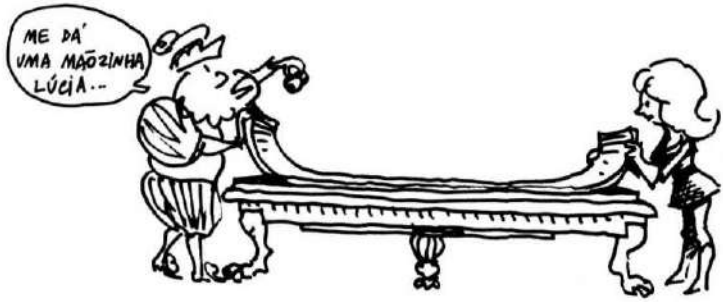
FOI PRECISO O GÊNIO DE GALILEU PARA AFIRMAR QUE* NÃO É PRECISO

FORÇA NENHUMA PARA MANTER UM OBJETO EM **MOVIMENTO RETILÍNEO UNIFORME.**

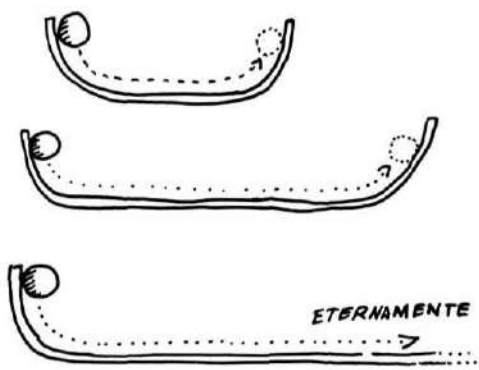
*N. do T.: A HISTÓRIA NÃO FOI BEM ASSIM, MAS DEIXA PRA LÁ...

A GRANDE "SACADA" DE GALILEU FOI VER QUE AS FORÇAS **MUDAM O MOVIMENTO** DOS OBJETOS. SE NÃO PERTURBADAS, AS COISAS PROSSEGUIRIAM EM LINHA RETA PARA SEMPRE. É A FORÇA DE **ATRITO** QUE AS FAZ IR PARANDO.

PODEMOS NOS CONVENCER DESSA IDÉIA COM UM EQUIPAMENTO SIMPLES; UMA FORRAÇÃO DE BORRACHA FLEXÍVEL.



UMA BOLA ROLANDO TENDE A ALCANÇAR A MESMA ALTURA DO OUTRO LADO... E SE NÃO HOUVESSE O OUTRO LADO ERGUIDO, ROLARIA ETERNAMENTE, NÃO FOSSE PELO ATRITO.



ISAAC **NEWTON** (1642-1727) RESUMIU A IDÉIA DE GALILEU COMO A **PRIMEIRA LEI DE NEWTON:**

SENDO NULA A FORÇA APLICADA A UM OBJETO, ELE TENDE A CONTINUAR EM REPOUSO, SE JÁ ESTIVESSE, OU A MANTER-SE COM O VALOR DE SUA VELOCIDADE CONSTANTE E EM LINHA RETA.

(ELE TAMBÉM DISSE: "SE PUDE VER LONGE, É PORQUE ESTIVE SOBRE O OMBRO DE GIGANTES", QUERENDO DIZER O DE GALILEU, CLARO...)

NA TERMINOLOGIA DESENVOLVIDA NO CAPÍTULO UM, DIRÍAMOS QUE QUANDO NÃO HÁ FORÇAS, OS OBJETOS SE MOVEM COM **VELOCIDADE VETORIAL CONSTANTE.**

NÓS CHAMAMOS INÉRCIA À PROPRIEDADE QUE LEVA OS OBJETOS A ATENDER À PRIMEIRA LEI DE NEWTON. **INÉRCIA**, É A RESISTÊNCIA À MUDANÇA NO MOVIMENTO.

POR INÉRCIA, PERMANEÇO EM REPOUSO!

A INÉRCIA DE UM CORPO É MEDIDA POR SUA **MASSA**. COISAS MASSIVAS TÊM GRANDE INÉRCIA, OU SEJA, É PRECISO MUITA FORÇA PARA ALTERAR SEU ESTADO DE MOVIMENTO.

PEQUENA INÉRCIA

GRANDE INÉRCIA

JÁ DISSEMOS ANTES QUE QUANDO RINGO ESTÁ NO CARRO QUE ACELERA, ELE SENTE UMA FORÇA.

É A FORÇA QUE O CARRO APLICA EM RINGO PARA, FAZENDO FACE A SUA INÉRCIA, PODER ACELERÁ-LO.

SR. NEWTON RESUMIRÁ:

CANDANGO CHAMANDO BASE: "A FORÇA VENCE A INÉRCIA E PROMOVE A ACELERAÇÃO". A BASE CAPTOU? CÂMBIO E DESLIGO!

NEWTON COLOCOU EM FORMA MATEMÁTICA A RELAÇÃO QUE ELE ESTABELECEU ENTRE FORÇA, MASSA E ACELERAÇÃO, A SUA

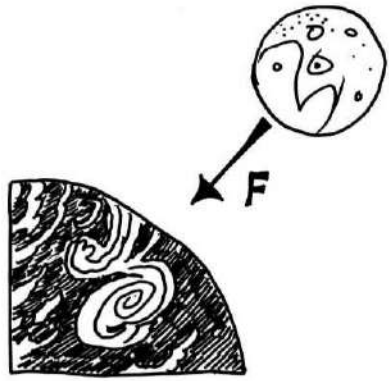
SEGUNDA LEI:

$$F = m \cdot a$$

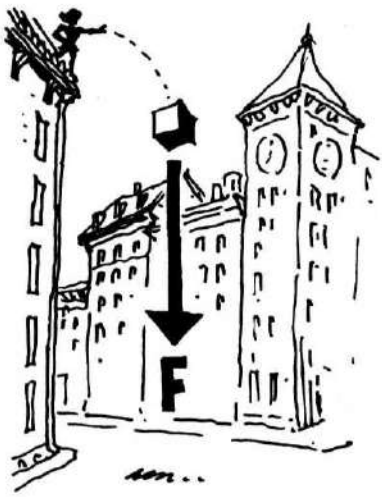
QUANTO MAIS FORÇA FOR APLICADA EM UM OBJETO, MAIS ELE ACELERA. MAS QUANTO MAIS MASSIVO FOR O OBJETO, MAIS ELE RESISTE À ACELERAÇÃO.

VEJAMOS DE NOVO A LUA. ELA FAZ UM CÍRCULO EM TORNO DA TERRA, OU MAIS OU MENOS 1650. COMO VIMOS, COISAS QUE FAZEM CÍRCULOS ESTÃO ACELERANDO. PORTANTO, HÁ UMA FORÇA ATUANDO NA LUA.
DEVE SER, ENTÃO, QUE

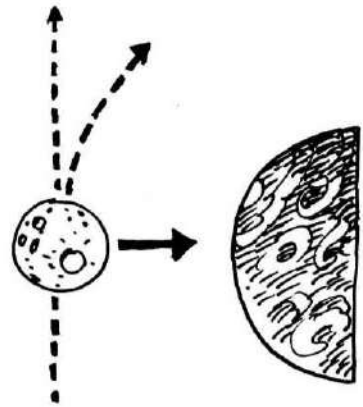
A TERRA ESTÁ PUXANDO A LUA.



SABEMOS QUE A TERRA PUXA OS OBJETOS PERTO DE SUA SUPERFÍCIE, ACELERANDO-OS PARA BAIXO.

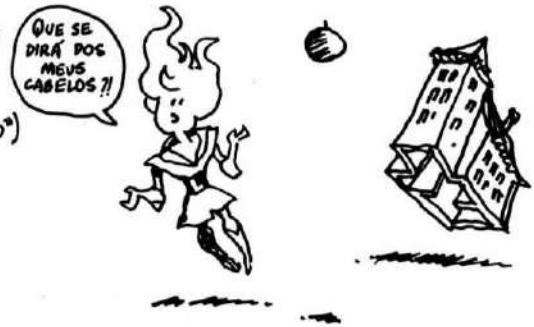


A MESMA FORÇA, A **GRAVIDADE**, AGE SOBRE A LUA, PUXANDO-A, AFASTANDO-A DA LINHA RETA QUE DESCREVERIA NA AUSÊNCIA DA GRAVIDADE.



SE LARGADA EM PLENO AR, UMA MAÇÃ FICARIA ALI PARADINHA (EM SEU "ESTADO DE MOVIMENTO")

SE NÃO FOSSE O EFEITO DA GRAVIDADE, FAZENDO-A CAIR.



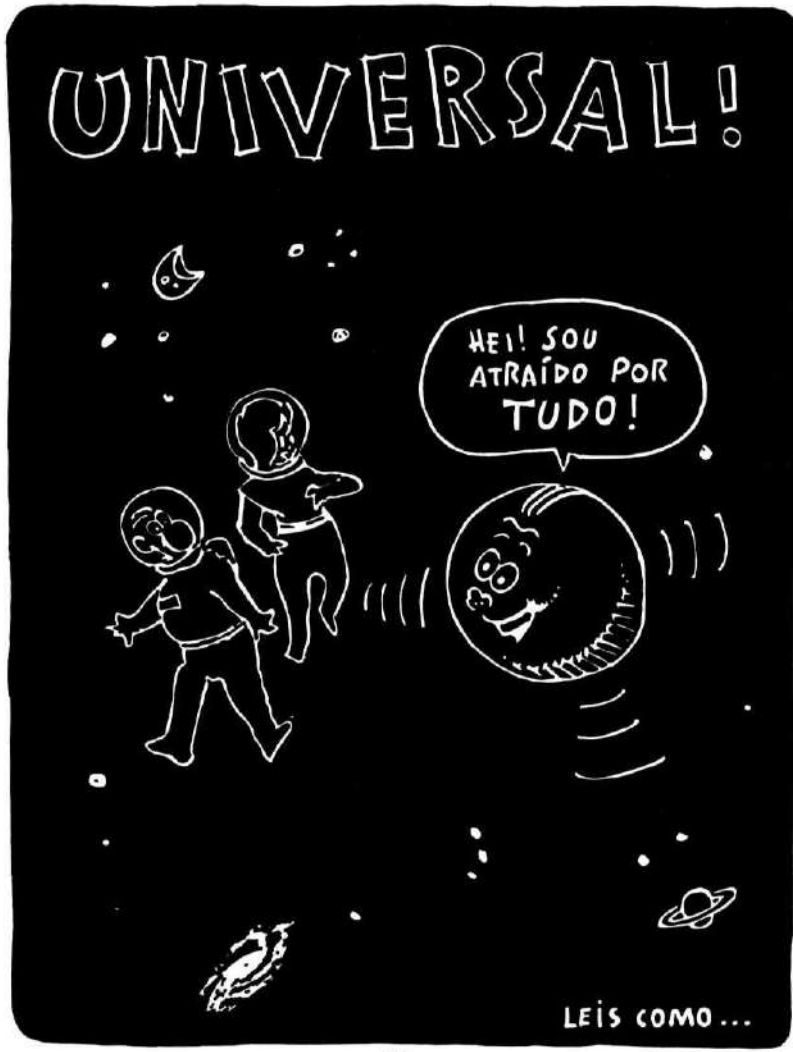
DA MESMA FORMA, NA AUSÊNCIA DA GRAVIDADE (OU DE OUTRAS FORÇAS), A LUA CONTINUARIA EM VELOCIDADE UNIFORME E EM LINHA RETA. MAS A GRAVIDADE A PUXA, ACELERANDO A LUA EM DIREÇÃO À TERRA. **A LUA ESTÁ CAINDO.** ESTÁ CAINDO FORA DE UM MOVIMENTO RETILÍNEO, TIPO "PRIMEIRA LEI"!

A CADA SEGUNDO A LUA DESVIA CERCA DE 1 mm DA TRAJETÓRIA RETILÍNEA.

EM 1 s UMA MAÇÃ CAI 4,9 m PERTO DA SUPERFÍCIE DA TERRA.

A LUA CAI MENOS QUE A MAÇÃ PORQUE A GRAVIDADE É MAIS FRACA LÁ, LONGE DA TERRA.

POR UM INSTANTE, MEDITE BEM SOBRE O FEITO DE NEWTON. A MAÇÃ E A LUA TÊM SEUS MOVIMENTOS REGIDOS PELAS MESMAS LEIS. CORPOS CELESTES NÃO SE COMPORTAM DE OUTRA FORMA QUE OS TERRESTRES. AS LEIS DE NEWTON TÊM UM SENTIDO...

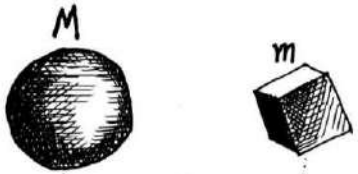


A FAMOSA LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

PARA A GRAVITAÇÃO A FÓRMULA DE NEWTON É:

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$$

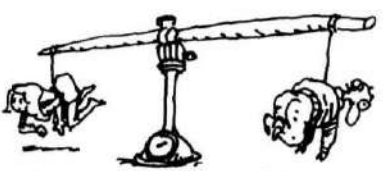
A FORÇA GRAVITACIONAL ENTRE DUAS MASSAS M E m É PROPORCIONAL AO PRODUTO DAS MASSAS E INVERSAMENTE PROPORCIONAL AO QUADRADO DA DISTÂNCIA ENTRE ELAS.



TUDO NO UNIVERSO ATRAI TUDO MAIS!! A TERRA ATRAI A LUA, A LUA ATRAI A TERRA. VOCÊ ME ATRAI...

É CLARO QUE SE AS MASSAS FOREM PEQUENAS COMO A SUA E A MINHA, A FORÇA É PEQUENA.

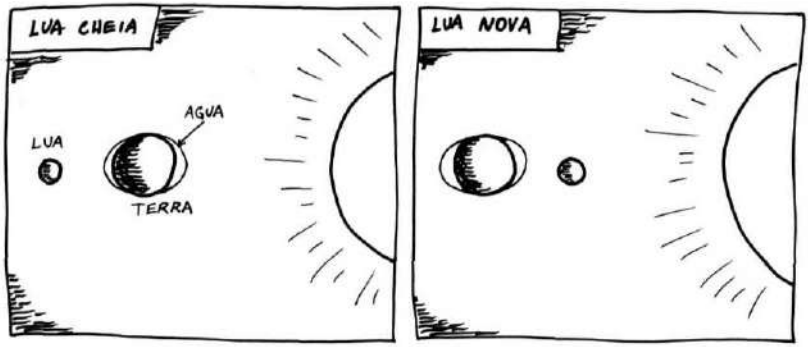
A LETRA G NA FÓRMULA É UMA CONSTANTE DA NATUREZA QUE INDICA A INTENSIDADE DA GRAVITAÇÃO. PODE-SE DETERMINAR G; SÓ É PRECISO UMA EXPERIÊNCIA DE MEDIDA DA ATRAÇÃO ENTRE DUAS MASSAS CONHECIDAS.



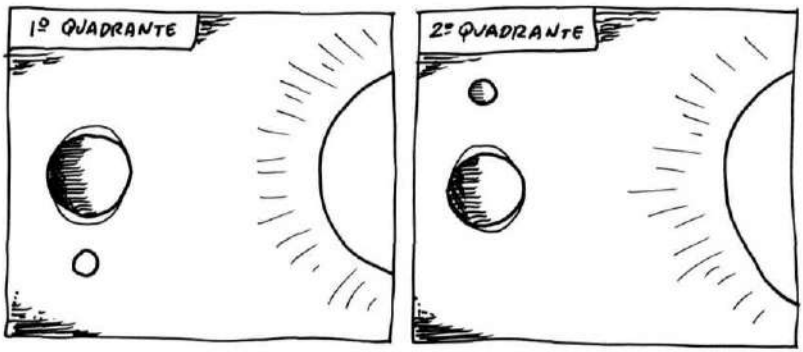
A GRAVIDADE DIMINUI COM A DISTÂNCIA. JÁ VIMOS QUE A LUA DISTANTE CAI MENOS QUE A TERRESTRE MAÇÃ. OUTRO EFEITO DESSA **LEI DO INVERSO DO QUADRADO** É A **MARÉ**, A SUBIDA E DESCIDA DA ÁGUA DO OCEANO, DUAS VEZES POR DIA.

A ÁGUA QUE ESTÁ DE FRENTE PARA A LUA, ESTÁ MAIS PERTO DELA DO QUE O CENTRO DA TERRA ESTÁ... ASSIM A LUA PUXA MAIS FORTE ESSA ÁGUA, QUE SE "AMONTOA" SOB A LUA. AGORA, COMO O CENTRO DA TERRA ESTÁ MAIS PERTO DA LUA QUE A ÁGUA DO OUTRO LADO, ELE É PUXADO MAIS FORTEMENTE QUE ELA E, POR ISSO, AQUELA ÁGUA TAMBÉM SE "AMONTOA"!

O SOL TAMBÉM PROVOCA MARÉS DA MESMA FORMA, MAS MENOS, DEVIDO A SUA GRANDE DISTÂNCIA. NA LUA CHEIA E NA LUA NOVA, A CADA MÊS, O SOL E A LUA ESTÃO ALINHADOS COM A TERRA. ENTÃO, DUAS VEZES POR MÊS, SOL E LUA JUNTOS PRODUZEM MARÉS SUPERALTAS E SUPERBAIXAS.

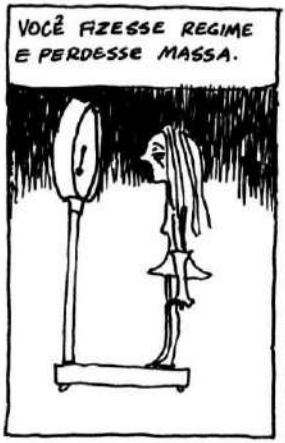


NO PRIMEIRO E NO ÚLTIMO QUADRANTES, O SOL E A LUA FAZEM COM A TERRA ÂNGULOS RETOS. ASSIM, A MARÉ DO SOL É SUBTRAÍDA DA MARÉ DA LUA, E A VARIAÇÃO DAS MARÉS FICA MENOR.



VEJAMOS AGORA O EFEITO DA GRAVIDADE SOBRE COISAS PRÓXIMAS À TERRA, VOCÊ, POR EXEMPLO. A FORÇA GRAVITACIONAL QUE ATUA EM VOCÊ É SEU **PESO.**

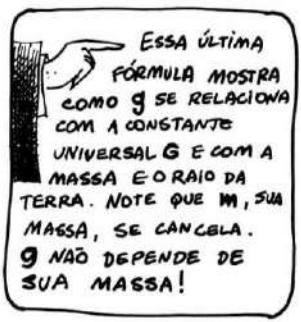
VOCÊ PESARIA MENOS SE...



SE VOCÊ PULAR DO TELHADO; QUAL É SUA ACELERAÇÃO? NOTE QUE AGORA PODEMOS EXPRESSAR A FORÇA GRAVITACIONAL SOBRE VOCÊ, DE DUAS FORMAS:

DA SEGUNDA LEI DE NEWTON:	DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL:
$F = mg$	$F = G\frac{Mm}{r^2}$

ESTABELECENDO A IGUALDADE ENTRE ELAS:
ACHAMOS $mg = G\frac{Mm}{r^2}$ E DAÍ $g = G\frac{M}{r^2}$

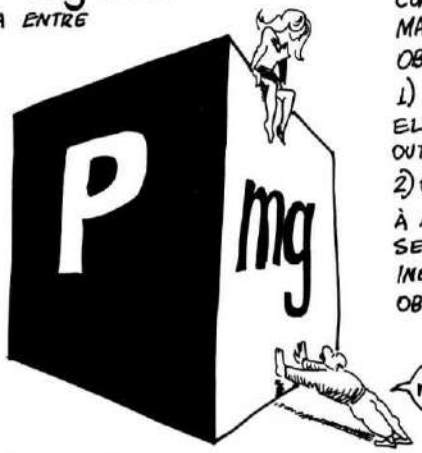

ESSA ÚLTIMA FÓRMULA MOSTRA COMO g SE RELACIONA COM A CONSTANTE UNIVERSAL G E COM A MASSA E O RAIO DA TERRA. NOTE QUE m, SUA MASSA, SE CANCELA. g NÃO DEPENDE DE SUA MASSA!

A FORÇA QUE A TERRA EXERCE EM VOCÊ $P = mg$ MOSTRA A DIFERENÇA ENTRE

PESO

E

MASSA.

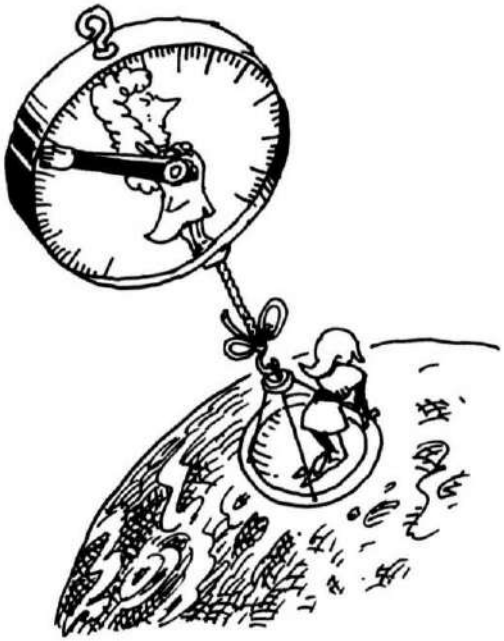


MASSA, m, TEM A VER COM A QUANTIDADE DE MATÉRIA DE UM OBJETO. MASSA MEDE

1) QUANTA GRAVIDADE ELE EXERCE EM OUTROS OBJETOS

2) QUANTO ELE RESISTE À ACELERAÇÃO, OU SEJA QUAL A INÉRCIA DO OBJETO.

PESO, P, É A INTENSIDADE DO PUXÃO GRAVITACIONAL SOBRE O OBJETO. DEPENDENDO DO LUGAR PODE MUDAR O PESO: NO ESPAÇO SIDERAL, HÁ LUGARES ONDE SEU PESO SERIA ZERO, MAS SUA MASSA SERÁ SEMPRE A MESMA, ONDE QUER QUE VOCÊ VÁ!



É CLARO QUE A GENTE MEDE PESO E MASSA COM UNIDADES DIFERENTES. NO SISTEMA MÉTRICO, O **GRAMA** É A UNIDADE DE MASSA ENQUANTO **NEWTON** É A UNIDADE DE FORÇA E, PORTANDO, DE PESO. UMA PESSOA COM MASSA 50 Kg (1 Kg = 1.000 GRAMAS) TEM UM PESO

$$P = mg$$
$$= (50\,kg).(9{,}8\,m/s^2)$$
$$= 490 \text{ NEWTONS}$$

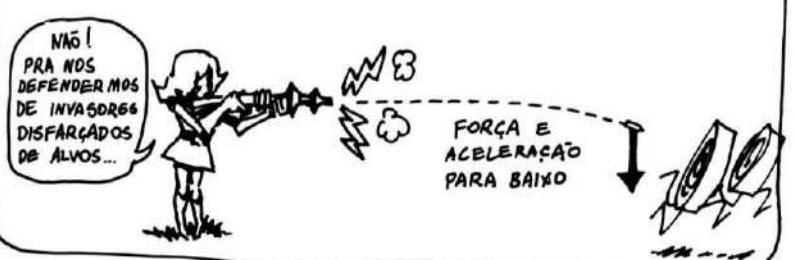
É TECNICAMENTE INCORRETO DIZER QUE ALGO PESA 50 Kg. O PESO É DADO EM UNIDADES DE FORÇA, NEWTONS.

AINDA ESTÁ CONFUSO? POIS BEM, LEMBRE-SE QUE UMA BALANÇA COMPARANDO PESOS TAMBÉM COMPARA MASSAS E ESTÁ GRADUADA EM MASSAS (Kg). NO ENTANTO, A GENTE DIZ QUE ESTÁ PESANDO! QUE TAL INVENTAR O VERBO "MASSAR"?

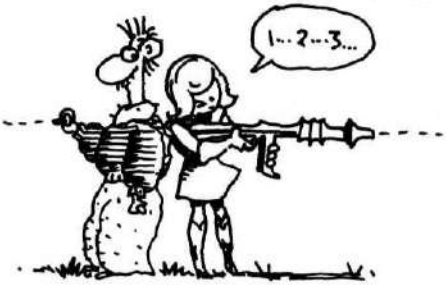
✦ CAPÍTULO 3 ✦
PROJÉTEIS

ATÉ AGORA ESTIVEMOS PESANDO COISAS E DEIXANDO-AS CAIR.

O MOVIMENTO DE PROJÉTIL MAIS SIMPLES É O "LANÇAMENTO HORIZONTAL", COMO UM TIRO COM ARMA NIVELADA, OU ALGO QUE DESPENCA DE UMA MESA APÓS DESLIZAR. A GRAVIDADE SÓ AGE NA **VERTICAL.** ELA SÓ AFETA O MOVIMENTO **PARA BAIXO.**



POR 1590, FICA JÁ EXPLICADA A CÉLEBRE DÚVIDA: SE O RINGO DEIXAR CAIR UMA BALA, NO MESMO INSTANTE EM QUE DOU UM TIRO HORIZONTAL, QUAL DAS BALAS TOCA O CHÃO ANTES, TENDO PARTIDO DA MESMA ALTURA?



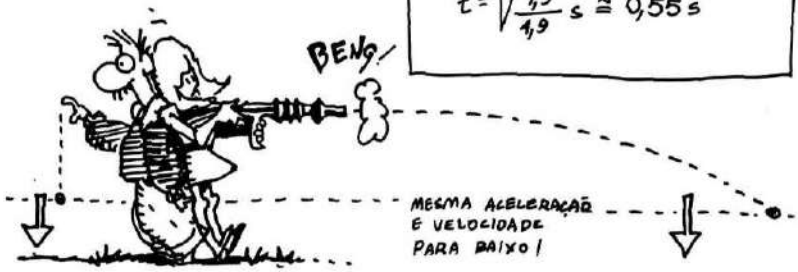
TOCAM O CHÃO NO MESMO INSTANTE, POIS CAEM COM A **MESMA ACELERAÇÃO** E **VELOCIDADE**. O MOVIMENTO HORIZONTAL NÃO INTERFERE NO VERTICAL!

EXEMPLO: SUPONHA QUE EU ATIRE DA ALTURA DO MEU OMBRO (1,50m). ENTÃO

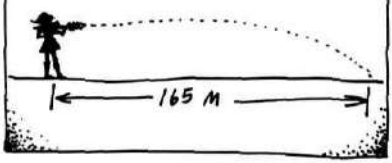
$$d = \frac{1}{2} g t^2 \text{ PORTANTO}$$

$$1{,}5\,m = \frac{1}{2} \cdot \left(9{,}8\,m/s^2\right) t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{1{,}5}{1{,}9}}\,s \cong 0{,}55\,s$$



SE A VELOCIDADE DA BALA É 300 m/s, ENTÃO ELA PERCORRE 165 m EM 0,55 s.



AGORA, OUTRA QUESTÃO: QUE ACONTECERIA SE A ARMA ESTIVESSE INCLINADA?

NA AUSÊNCIA DA GRAVIDADE A BALA DESCREVERIA UMA RETA PARA SEMPRE (1ª LEI).
COM A GRAVIDADE, ELA **CAI, AFASTANDO-SE DA RETA!**

ACELERAÇÃO
g

... O QUE NOS CONDUZ AO EXPERIMENTO IMAGINÁRIO DENOMINADO

"O MACACO E O CAÇADOR."

ABAIXO AS EXPERIÊNCIAS COM ANIMAIS!

UM CAÇADOR MIRA SUA ARMA DIRETAMENTE A UM MACACO DEPENDURADO NUMA ÁRVORE.

O MACACO, MUITO ESPERTO, SOLTA-SE NO EXATO MOMENTO EM QUE É DADO O TIRO.
O QUE ACONTECE?

PUM!!!

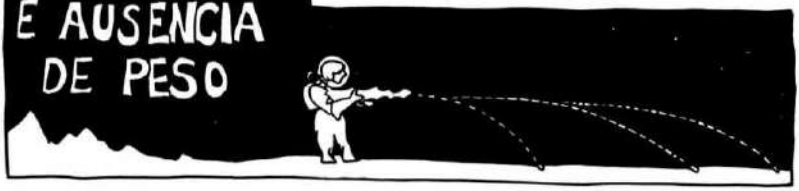
POBRE SÍMIO, QUE NÃO SABE DA INDEPENDÊNCIA ENTRE OS MOVIMENTOS DE AVANÇO E DE QUEDA DA BALA!

MAS VOCÊ SABE E, PORTANTO, PERCEBE QUE A BALA ACERTARÁ O MACACO DA MESMA MANEIRA.

· CAPÍTULO 4 ·

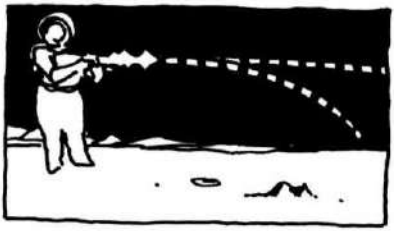
MOVIMENTO DOS SATÉLITES E AUSÊNCIA DE PESO

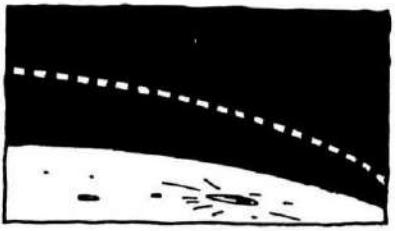
OLHA A GENTE AQUI NA LUA, SEM RESISTÊNCIA DO AR. VEJA QUE, AO DAR TIROS HORIZONTAIS COM VELOCIDADE CADA VEZ MAIOR, AS BALAS TOCAM O CHÃO NO MESMO TEMPO - O MOVIMENTO HORIZONTAL NÃO AFETA A TAXA DE QUEDA - MAS, QUANTO MAIS RÁPIDA, MAIS LONGE VAI A BALA ANTES DE BATER NO CHÃO DA LUA.



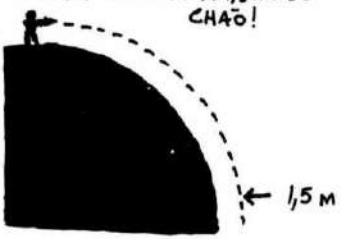
COM A ARMA A 1,5 M DO CHÃO, NA TERRA A QUEDA LEVARIA 0,55 S, MAS AQUI, QUE A GRAVIDADE É MENOR, LEVA MAIS TEMPO PARA CAIR.

MAS, À MEDIDA QUE AS BALAS VÃO MAIS E MAIS LONGE, ALGO NOVO OCORRE. COMO A LUA NÃO É PLANA MAS SIM REDONDA, O CHÃO SE CURVA SOB A BALA E PARA MAIS LONGE DELA...



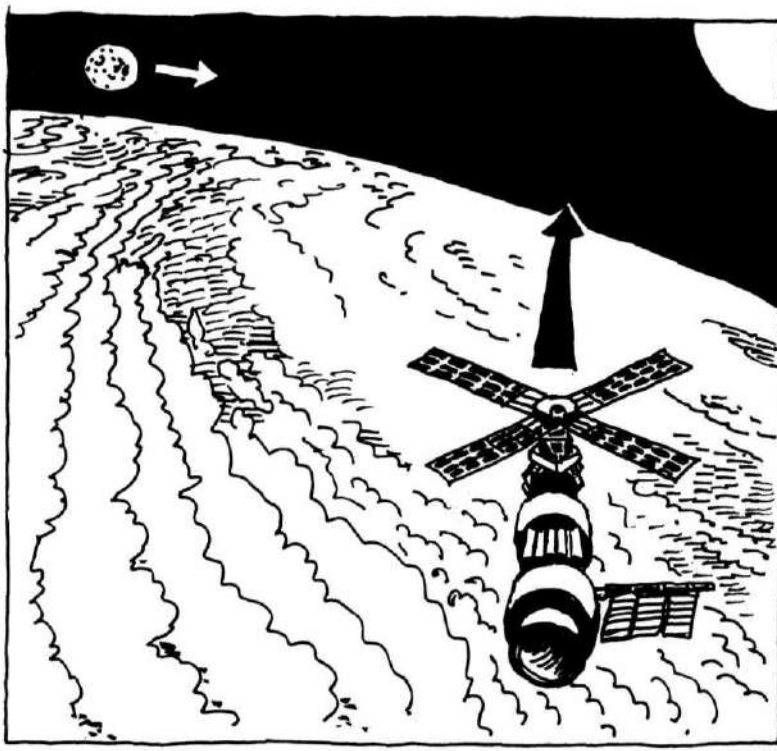


POR FIM, HÁ UMA VELOCIDADE TÃO GRANDE DA BALA, QUE QUANDO ELA TIVER CAÍDO 1,5 M, O CHÃO TAMBÉM TERÁ CURVADO 1,5 M; A BALA AINDA ESTARÁ A 1,5 M DO CHÃO!



A BALA ESTARÁ NUMA ÓRBITA LUNAR DE 1,5 M DE ALTURA, CAINDO CONTINUAMENTE, MAS COM O CHÃO SE CURVANDO CONTINUAMENTE EMBAIXO DELA, MANTENDO A ALTURA DE 1,5 M. ATIRAR PARA A FRENTE É, NESSAS CONDIÇÕES, MAIS PERIGOSO QUE CUSPIR PARA O ALTO...

É CLARO QUE SATÉLITES VOANDO TÃO BAIXO SÓ FUNCIONAM SEM RESISTÊNCIA DO AR (E SEM OBSTÁCULOS DE 1,5 m QUE OS DETENHAM). A EXPERIÊNCIA, CONTUDO, ILUSTRA O PRINCÍPIO DO MOVIMENTO DE SATÉLITES. DA TERRA, LANÇAMOS SATÉLITES ACIMA DA ATMOSFERA, COM FOGUETES. EM SEGUIDA ENTORTAMOS SEU TRAJETO E LHES DAMOS SUFICIENTE VELOCIDADE **HORIZONTAL**, DE FORMA QUE A CURVATURA DA TERRA BASTE PARA COMPENSAR SUA QUEDA.



DA MESMA FORMA, NOSSO SATÉLITE NATURAL, A LUA, CAI CONTINUAMENTE, MAS É LEVADO ADIANTE PELO COMPONENTE HORIZONTAL E SUA ALTURA PERMANECE A MESMA, EM RELAÇÃO À TERRA (A ÓRBITA DA LUA É QUASE CIRCULAR).

VAMOS AGORA NO ÔNIBUS ESPACIAL. QUANDO ALCANÇAMOS VELOCIDADE ORBITAL EU DESLIGO OS REATORES, E A ÚNICA FORÇA SOBRE NÓS É A **GRAVIDADE**. E NÓS CAÍMOS EM DIREÇÃO À TERRA.

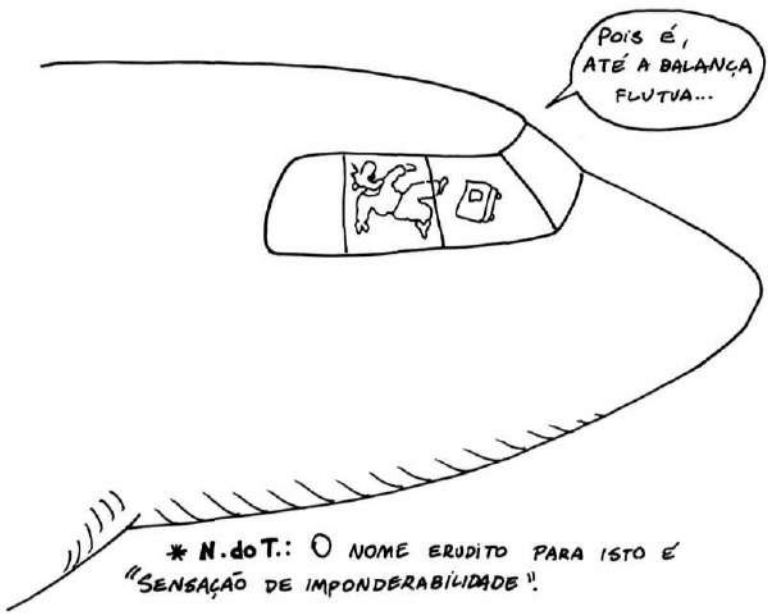
UAU!

MAS O MESMO É VERDADE PRO ÔNIBUS ESPACIAL. ELE TAMBÉM ESTÁ CAINDO, COM A MESMA ACELERAÇÃO.

NÃO HÁ AÇÃO RELATIVA ENTRE NÓS E A NAVE E NÓS FLUTUAMOS LIVREMENTE EM SEU INTERIOR, SEM PESO!

SE VOCÊ SOLTAR UMA MAÇÃ, ELA FLUTUA. SE VOCÊ LHE DER UM PETELECO, ELA SAI EM LINHA RETA, UNIFORMEMENTE. ELA OBEDECE À PRIMEIRA LEI DE NEWTON!

SEMPRE QUE A ÚNICA FORÇA EM AÇÃO FOR A GRAVIDADE, NÃO IMPORTA SE SE ESTÁ SUBINDO, DESCENDO OU EM ÓRBITA, OS OBJETOS NA NAVE NÃO SENTEM PESO*.



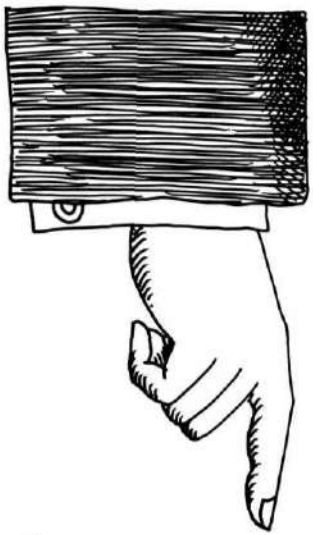
* N.doT.: O NOME ERUDITO PARA ISTO É "SENSAÇÃO DE IMPONDERABILIDADE".

PODEMOS REPRODUZIR A EXPERIÊNCIA NA TERRA. É SÓ ESTAR NUM ELEVADOR CUJO CABO É CORTADO!

!!

VOCÊ VAI FICAR IMPONDERÁVEL UM TEMPINHO

BOA-LINHA VOCÊ!

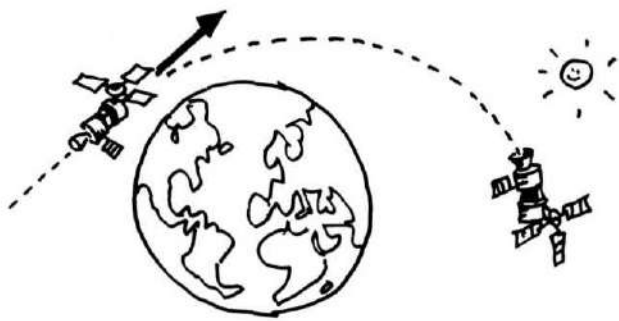


PORTANTO, A DESPEITO DE A GRAVIDADE PRODUZIR ACELERAÇÃO, AS FORÇAS ASSOCIADAS A ESSA ACELERAÇÃO NÃO SÃO SENSÍVEIS NO SISTEMA.

ESSA FOI OUTRA DEIXA PARA O EINSTEIN ACHAR QUE GRAVIDADE É UMA PROPRIEDADE DO ESPAÇO, NÃO DOS OBJETOS.

◊ CAPÍTULO 5 ◊
OUTRAS ÓRBITAS

ATÉ AGORA SÓ VIMOS ÓRBITAS CIRCULARES: SATÉLITES PROJETADOS COM VELOCIDADE HORIZONTAL EXATA PARA QUE CAIAM (FORA DA RETA) NA MEDIDA PARA DESCREVEREM UM CÍRCULO. O QUE ACONTECERIA SE FOSSEM PROJETADOS COM OUTRA VELOCIDADE OU OUTRO ÂNGULO?



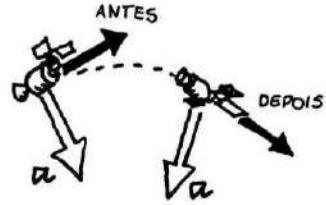
UMA FORMA DE CALCULAR A ÓRBITA É PELO USO DE UMA TÉCNICA MATEMÁTICA, HÁ MUITO PREZADA E CONHECIDA COMO "FORÇA BRUTA."

O MÉTODO FORÇA-BRUTA COMEÇA COM A FÓRMULA DA GRAVITAÇÃO

$$F = G\frac{Mm}{r^2}.$$

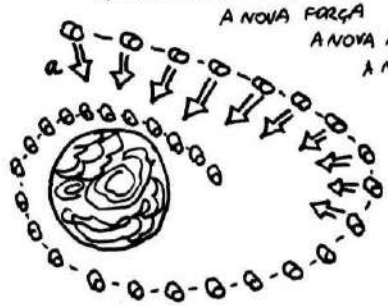
(M = MASSA DA TERRA; m = MASSA DO SATÉLITE; r = DISTÂNCIA ENTRE ELES; G = CONSTANTE.) ESSA FÓRMULA DÁ A FORÇA SOBRE O SATÉLITE; ASSIM PODEMOS CALCULAR SUA ACELERAÇÃO PELA SEGUNDA LEI DE NEWTON

$a = F/m$. ENTÃO, PODEMOS COMPUTAR QUANTO MUDA SUA VELOCIDADE DEVIDO À SUA ACELERAÇÃO.



ALIÁS, DEPOIS DE SE MOVER UM POUCO, r É DIFERENTE; PORTANTO, TERÁ MUDADO A FORÇA GRAVITACIONAL SOBRE O CORPO! ASSIM, TEMOS QUE **RE**CALCULAR A ACELERAÇÃO E A NOVA VELOCIDADE PARA OS PRÓXIMOS POUCOS INSTANTES ... E ENTÃO RECALCULAR DO NOVO... DE NOVO ... DE NOVO... MILHARES DE VEZES!

A CADA PASSO COMPUTE:
A NOVA FORÇA
A NOVA ACELERAÇÃO
A NOVA VELOCIDADE
A NOVA POSIÇÃO...
A NOVA FORÇA
A NOVA ACELERAÇÃO

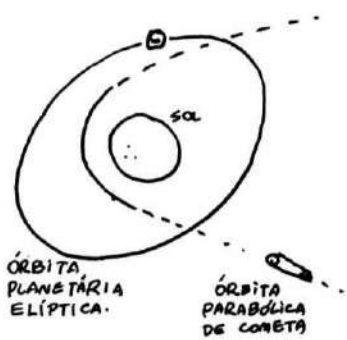


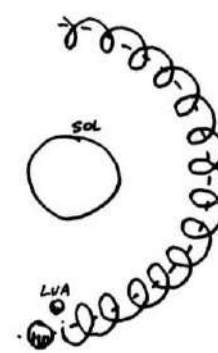
ETC.!

(DIGA-SE DE PASSAGEM, ESSE PROCEDIMENTO PASSO A PASSO É CHAMADO "INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DE UMA EQUAÇÃO DIFERENCIAL")

SE HOUVER SÓ DOIS CORPOS PRESENTES, O CÁLCULO PERMITE DEDUZIR AS FÓRMULAS PARA AS ÓRBITAS. AS ÚNICAS ÓRBITAS ENTÃO POSSÍVEIS DEVIDO À GRAVIDADE SÃO CÍRCULOS, ELIPSES, PARÁBOLAS E HIPÉRBOLES.

MAS SE HOUVER MAIS DE DOIS CORPOS, A FORÇA-BRUTA E O COMPUTADOR SÃO NOSSA SALVAÇÃO. POR EXEMPLO, A LUA FAZ UM GIRO EM SACAROLHA COM RELAÇÃO AO SOL.

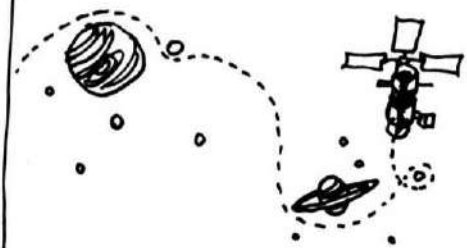




PARECE UM VAGA-LUME GIGANTE!

POR SORTE (PRA QUEM PRECISA CALCULAR), O SOL É TÃO MASSIVO QUE SUA GRAVIDADE É PREDOMINANTE NO SISTEMA SOLAR E AS ÓRBITAS PLANETÁRIAS SÃO ELIPSES PRATICAMENTE EXATAS.

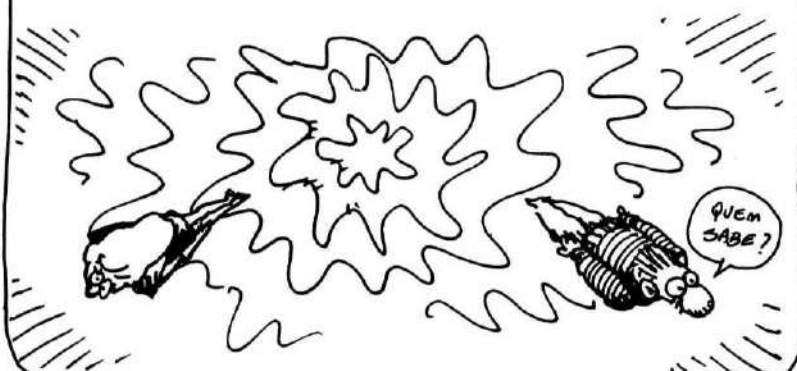
O PRIMEIRO A REVELAR ÓRBITAS ELÍPTICAS FOI **KEPLER** (1571-1630), QUE PROVOU QUE A ÓRBITA DE MARTE É ELÍPTICA. MAIS TARDE, NEWTON MOSTROU QUE ESSAS ÓRBITAS RESULTAM DA LEI DO INVERSO DOS QUADRADOS.



DE FATO, AS ELIPSES SÃO APROXIMAÇÕES E A GENTE USA A MATEMÁTICA "FORÇA-BRUTA" PARA CALCULAR A TRAJETÓRIA DAS SONDAS QUE SÃO ENVIADAS AOS PLANETAS.

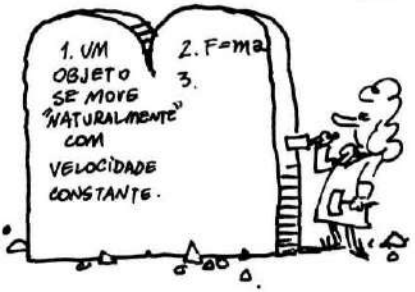
AS EQUAÇÕES SÃO SIMPLES. ELAS DESCREVEM O **TIPO** GERAL DE MOVIMENTO, MAS O MOVIMENTO QUE DE FATO OCORRE DEPENDE DAS POSIÇÕES E VELOCIDADES ORIGINAIS DE TODOS OS CORPOS. O SISTEMA SOLAR É GOVERNADO POR $F = G\frac{Mm}{r^2}$ E $F = ma$, MAS ENVIAR UMA SONDA ESPACIAL EXIGE UMA ENORME COMPUTAÇÃO.

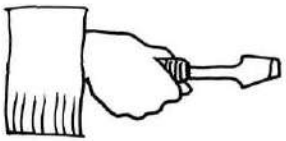
MUITO DA FÍSICA É ASSIM: ACHE AS CONDIÇÕES INICIAIS E RESOLVA-AS PARA O CASO EM QUESTÃO. SERIA POSSÍVEL, QUEM SABE, DESCREVER TODA A FÍSICA DO UNIVERSO COM UMA PEQUENA LISTA DE EQUAÇÕES, COMEÇANDO PELAS CONDIÇÕES INICIAIS DO **BIG BANG?**



◊CAPÍTULO 6◊
TERCEIRA LEI DE NEWTON

ATÉ AGORA VIMOS AS DUAS PRIMEIRAS LEIS DE NEWTON VEJAMOS AGORA A TERCEIRA:



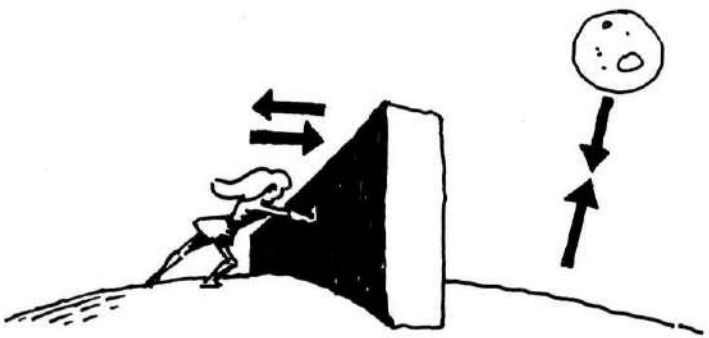


TERCEIRA LEI DE NEWTON: SE UM OBJETO EXERCE UMA FORÇA SOBRE OUTRO, O OUTRO EXERCE NO PRIMEIRO FORÇA IGUAL MAS EM SENTIDO OPOSTO.

EM OUTRAS PALAVRAS,:

À AÇÃO EQUIVALE A REAÇÃO.

POR EXEMPLO, QUANDO EU EMPURRO UMA PAREDE, A PAREDE ME EMPURRA DE VOLTA COM A MESMA FORÇA. A TERRA ATRAI A LUA COM A MESMA INTENSIDADE COM QUE A LUA ATRAI A TERRA.

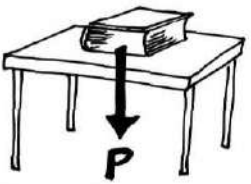


A ATRAÇÃO DA LUA PELA TERRA FAZ A LUA DESCREVER UMA ÓRBITA (QUASE) CIRCULAR. E A ATRAÇÃO DA TERRA PELA LUA CAUSA O QUE NA TERRA?

ÓRBITA DA TERRA
A FORÇA SOBRE A TERRA FAZ ELA DESCREVER PEQUENA ÓRBITA CURVILÍNEA
ATÉ OS SATÉLITES ARTIFICIAIS MOVEM A TERRA UM POUQUINHO!

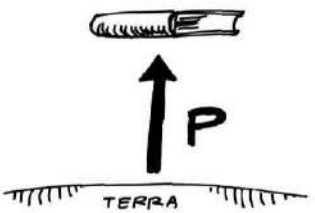
VEJA O LIVRO SOBRE A MESA. QUAL A FORÇA DE REAÇÃO AO PESO **P**?

NÃO É A REAÇÃO NORMAL DA MESA!



O OUTRO CORPO QUE **CAUSA** A FORÇA **P** NO LIVRO É A **TERRA!**

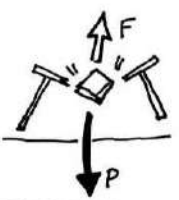
A TERRA PUXA O LIVRO COM A FORÇA **P**, ENTÃO O LIVRO PUXA A TERRA COM A FORÇA **P**!



MAS A MESA NÃO EMPURRA O LIVRO PRA CIMA? SIM, É O CASO. O LIVRO NÃO ESTÁ SENDO ACELERADO, PORTANTO, PELA SEGUNDA LEI, A FORÇA TOTAL SOBRE ELE É NULA. SE A TERRA PUXA O LIVRO, ALGO DEVE ESTAR COMPENSANDO ISTO, E É A MESA COM **F=P**. PERCEBA, PORÉM, QUE SE A MESA FOR FRÁGIL DEMAIS PARA O LIVRO, PODE NÃO PROVER FORÇA SUFICIENTE PARA CIMA; A MESA SE QUEBRA E O LIVRO CAI!

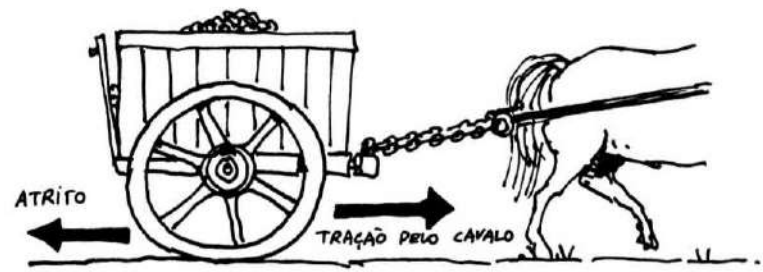
FORÇAS NO LIVRO

F=P

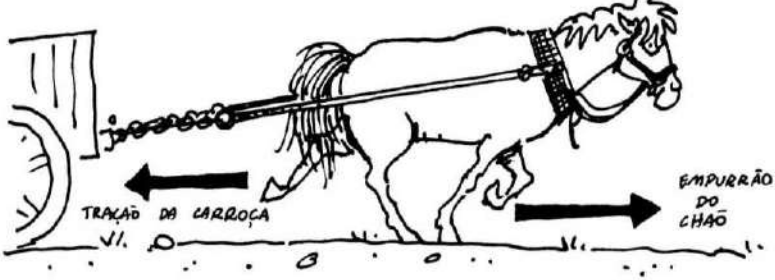


F<P

E LÁ VAI OUTRO EXEMPLO: COMO PODE O CAVALO PUXAR A CARROÇA, SE ELA PUXA O CAVALO COM FORÇA IGUAL? PARA ANALISAR ISSO, OLHEMOS CADA OBJETO, POR SI SÓ, E AS FORÇAS AGINDO NELE.

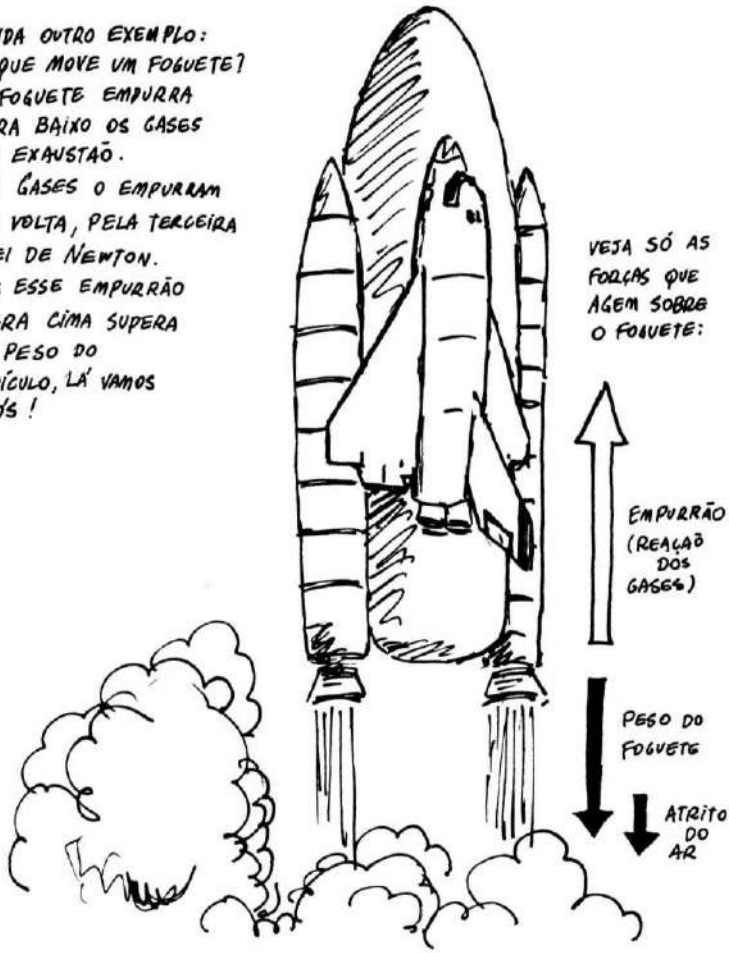


QUE FORÇAS AGEM NA CARROÇA? O CAVALO A PUXA PARA A FRENTE E HÁ UMA FORÇA PARA TRÁS EXERCIDA PELO CHÃO: **O ATRITO.** SE A TRAÇÃO DO CAVALO EXCEDE O ATRITO, ENTÃO A CARROÇA DEVE ACELERAR.

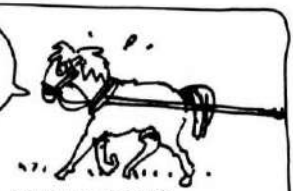


AGORA O CAVALO: A CARROÇA PUXA-O PARA TRÁS, DE ACORDO COM A TERCEIRA LEI DE NEWTON. E O QUE É QUE O EMPURRA PARA A FRENTE? É O CHÃO !!! O CAVALO "EMPURRA" O CHÃO PARA TRÁS E O CHÃO REAGE COM FORÇA IGUAL. SE O CAVALO EMPURRA O CHÃO COM FORÇA MAIOR QUE A FORÇA DE RESISTÊNCIA DA CARROÇA, ENTÃO O CAVALO DEVE ACELERAR!

AINDA OUTRO EXEMPLO:
O QUE MOVE UM FOGUETE?
O FOGUETE EMPURRA PARA BAIXO OS GASES DE EXAUSTÃO.
OS GASES O EMPURRAM DE VOLTA, PELA TERCEIRA LEI DE NEWTON.
SE ESSE EMPURRÃO PARA CIMA SUPERA O PESO DO VEÍCULO, LÁ VAMOS NÓS!



NOTE: NÃO É NECESSÁRIO QUE OS GASES DE EXAUSTÃO AJAM SOBRE O AR. DE FATO, O AR SÓ AGE FREIANDO O FOGUETE POR ATRITO.*



*N.do T.: ISTO NÃO VALE PARA UM AVIÃO COMUM. PENSE O PORQUÊ.

◊ CAPÍTULO 7 ◊
MAIS SOBRE FORÇAS

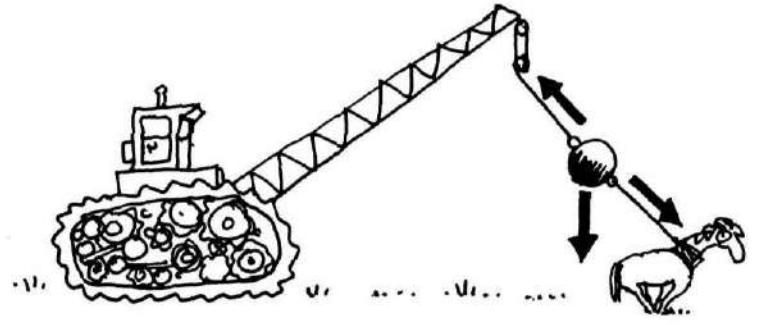
PODE-SE PENSAR NAS LEIS DE NEWTON COMO DESCREVENDO O EFEITO DAS FORÇAS:

1. SEM FORÇA ALGUMA, OS OBJETOS MANTÊM VELOCIDADE CONSTANTE.

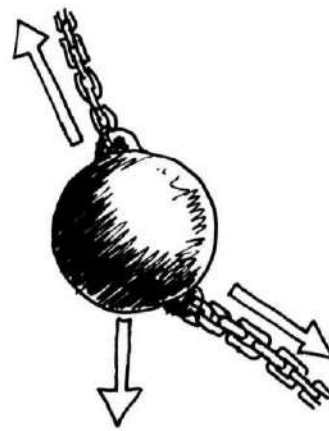
2. UMA FORÇA PRODUZ UMA ACELERAÇÃO PROPORCIONAL A ELA (E INVERSAMENTE PROPORCIONAL À MASSA).

3. OS OBJETOS EXERCEM, RECIPROCAMENTE, FORÇAS IGUAIS E OPOSTAS UNS NOS OUTROS.

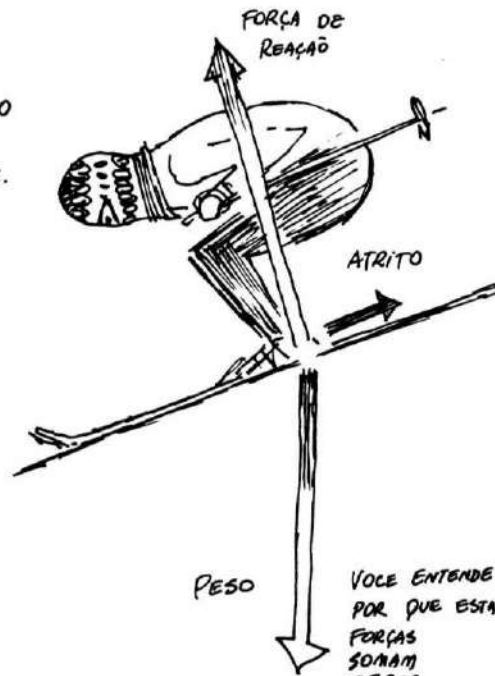
FORÇA É UMA "QUANTIDADE VETORIAL". COMO A VELOCIDADE E A ACELERAÇÃO, NÃO TEM SÓ UMA **MAGNITUDE** MAS TAMBÉM UMA **DIREÇÃO**. NESTA FIGURA, HÁ FORÇAS QUE PUXAM EM DIFERENTES DIRECÇÕES:



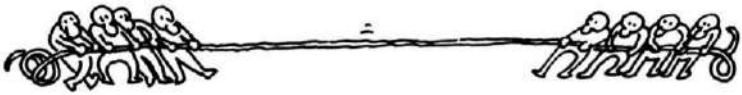
SÓ QUE, NESTE CASO, A SOMA DE TODAS AS FORÇAS É ZERO, OU SEJA A FORÇA "LÍQUIDA" OU FORÇA RESULTANTE É NULA, POIS A MASSA NÃO ESTÁ SE ACELERANDO (MAIS UMA VEZ, A SEGUNDA LEI DE NEWTON!)



CONSIDERE AS FORÇAS SOBRE UM ESQUIADOR DESLIZANDO MORRO ABAIXO COM VELOCIDADE CONSTANTE. HÁ SEU PESO, HÁ A REAÇÃO DO SOLO E HÁ A FORÇA DE ATRITO. MAS, DE NOVO, A FORÇA **TOTAL** DEVE SER ZERO.

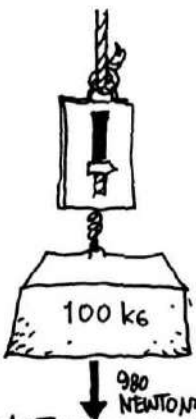


IMAGINE AGORA UM "CABO DE GUERRA" EM QUE CADA TIME PUXE COM UMA FORÇA DE 980 NEWTONS. QUAL A TENSÃO NA CORDA? SERÁ 2×980 = 1960 NEWTONS?

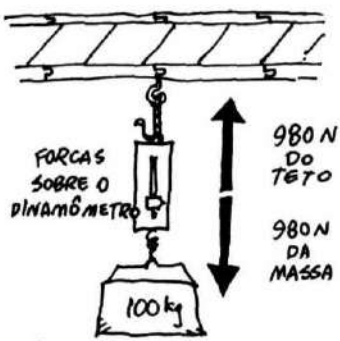


A TENSÃO É DEFINIDA COMO O VALOR QUE SERIA LIDO POR UM DINAMÔMETRO DE MOLA* INSERIDO NO CABO.

VOCÊ PODE QUERER COMPARAR ESSA SITUAÇÃO COM O PESAR UMA MASSA DE 100 Kg COM O MESMO DINAMÔMETRO. A MASSA TEM UM PESO DE 980 NEWTONS (=mg).

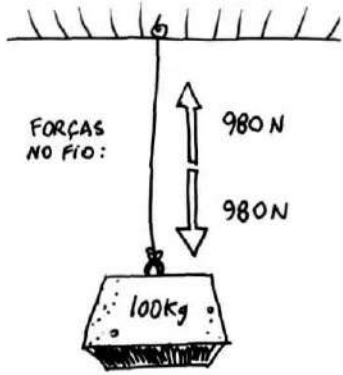


A MASSA PUXA PARA BAIXO, NO DINAMÔMETRO, COM UMA FORÇA DE 980 NEWTONS; PORTANTO, O DINAMÔMETRO PUXA A MASSA COM A MESMA FORÇA. ASSIM, O DINAMÔMETRO PUXA O TETO E O TETO PUXA DE VOLTA COM OS MESMOS 980 NEWTONS!

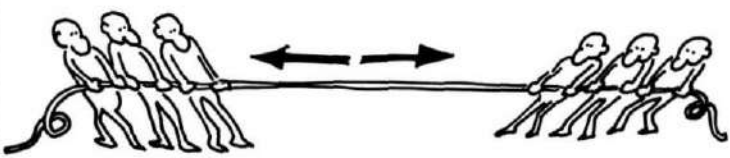


* N. do T.: VULGO "BALANÇA DE PEIXEIRO".

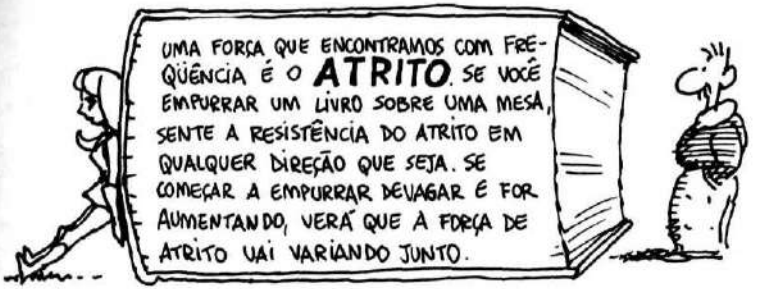
É O FIO QUE TRANSMITE A FORÇA DA MASSA (ATRAVÉS DO DINAMÔMETRO) PARA O TETO. A MASSA E O FIO PUXAM UM AO OUTRO IGUALMENTE PELA TERCEIRA LEI, DE FORMA QUE A TENSÃO NO FIO (A LEITURA DO DINAMÔMETRO) É 980 NEWTONS.



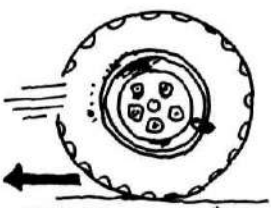
ISSO CONVENCE VOCÊ DE QUE A TENSÃO NO CABO-DE-GUERRA É **TAMBÉM** 980 NEWTONS? A CORDA TRANSMITE A FORÇA DE UM TIME PARA O OUTRO.



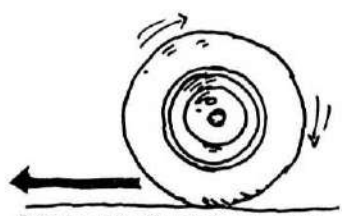
SE VOCÊ PRENDESSE UM EXTREMO DA CORDA A UM POSTE E AMBOS OS TIMES PUXASSEM JUNTOS, ENTÃO A TENSÃO DOBRARIA.


UMA FORÇA QUE ENCONTRAMOS COM FREQÜÊNCIA É O ATRITO. SE VOCÊ EMPURRAR UM LIVRO SOBRE UMA MESA, SENTE A RESISTÊNCIA DO ATRITO EM QUALQUER DIREÇÃO QUE SEJA. SE COMEÇAR A EMPURRAR DEVAGAR E FOR AUMENTANDO, VERÁ QUE A FORÇA DE ATRITO VAI VARIANDO JUNTO.

VOCÊ PERCEBE QUE O ATRITO DIMINUI UM POUCO QUANDO O LIVRO COMEÇA A SE MOVER? DIZEMOS QUE O ATRITO **ESTÁTICO**, QUANDO AS SUPERFÍCIES ESTÃO ESTACIONÁRIAS, CRESCE ATÉ CERTO VALOR MÁXIMO QUE É QUANDO ELE CEDE. O ATRITO **DINÂMICO**, QUANDO CONSEGUIMOS MOVER O OBJETO, É MENOR QUE O ATRITO ESTÁTICO MÁXIMO. EIS POR QUE UM CARRO CUJAS RODAS DERRAPAM DEMORA MAIS PARA PARAR QUE OUTRO CUJAS RODAS GIRAM, DURANTE UMA FREADA.

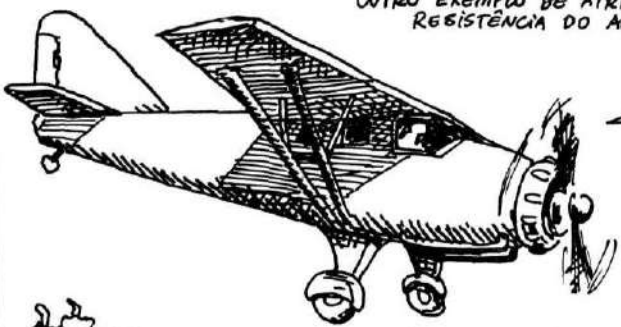


RODA "BLOQUEADA", DERRAPANDO NUMA FREADA. DAÍ, ATRITO DINÂMICO.



O PONTO DE CONTATO DE UMA RODA GIRANDO É MOMENTANEAMENTE ESTACIONÁRIO(!), PORTANTO A FREADA NESTE CASO SE DÁ POR ATRITO ESTÁTICO.

OUTRO EXEMPLO DE ATRITO É A RESISTÊNCIA DO AR.



VOCÊ A PERCEBE PONDO A MÃO PRA FORA DE UM VEÍCULO EM MOVIMENTO.

SALTAR DE PÁRA-QUEDAS É UMA FORMA EXCITANTE DE SENTIR A RESISTÊNCIA DO AR. LOGO QUE VOCÊ SALTA, A GRAVIDADE É A ÚNICA FORÇA SOBRE VOCÊ, E VOCÊ TEM ACELERAÇÃO g.

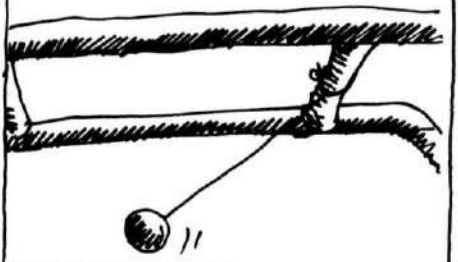
AO CRESCER SUA VELOCIDADE, AUMENTA TAMBÉM O ATRITO DO AR, DIMINUI ASSIM SUA ACELERAÇÃO.

A CERTA VELOCIDADE QUE DEPENDE DO SEU PESO E DO TIPO DE ROUPA, ETC., O ATRITO SE IGUALA À GRAVIDADE E A SUA VELOCIDADE NÃO CRESCE MAIS - CHAMAMOS ESSE LIMITE "NATURAL" DE **VELOCIDADE TERMINAL.**

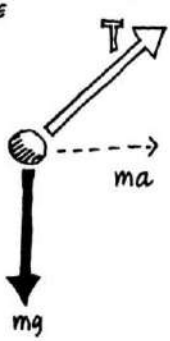
O ATRITO DEPENDE FORTEMENTE DA ÁREA QUE É "FRONTAL AO VENTO", RAZÃO PELA QUAL UM PÁRA-QUEDAS CONSEGUE DIMINUIR MUITÍSSIMO (A UNS POUCOS m/s) SUA VELOCIDADE TERMINAL. PARA ISSO ELE SERVE!

ALGUMAS FORÇAS SÃO FICTÍCIAS !!!

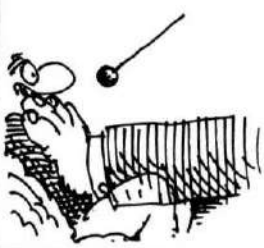
LEMBRA-SE DA BOLA DO ACELERÔMETRO QUE NÓS DEPENDURAMOS NA BARRA DA CAPOTA DO RINGO? ELA E O FIO SE INCLINAM PARA TRÁS QUANDO ELE ACELERA, MAS POR QUÊ?



AGEM SÓ DUAS FORÇAS REAIS SOBRE A BOLA: A GRAVIDADE DE MAGNITUDE **mg** E A TENSÃO **T** DO FIO. QUANDO ELE ACELERA, A SOMA DESSAS DUAS FORÇAS APONTA PARA A FRENTE COM MAGNITUDE **ma**, PELA SEGUNDA LEI DE NEWTON. POR ISSO, O FIO SE INCLINA.

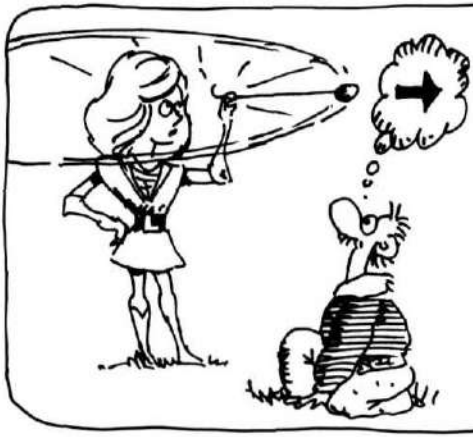


MAS O RINGO, NO CARRO, IMAGINA UMA FORÇA ESTRANHA, EMPURRANDO TUDO PARA TRÁS!



MAS NÃO HÁ NADA EMPURRANDO. A "FORÇA" É FICTÍCIA, UM EFEITO DA **INERCIA** QUE RESISTE À ACELERAÇÃO DO CARRO.

HÁ FORÇAS LATERAIS E FRONTAIS QUE VOCÊ SENTE AO DIRIGIR UM CARRO QUE SÃO FICTÍCIAS, RESULTADO DE SUA PRÓPRIA INÉRCIA RESISTINDO À ACELERAÇÃO.



QUANDO EU GIRO UMA BOLA PRESA A UM FIO, EM TORNO DA MINHA CABEÇA, HÁ QUEM PENSE QUE UMA FORÇA CENTRÍFUGA MANTÉM O FIO ESTICADO. PORÉM, NÃO HÁ FORÇA ALGUMA EMPURRANDO A BOLA PARA FORA!

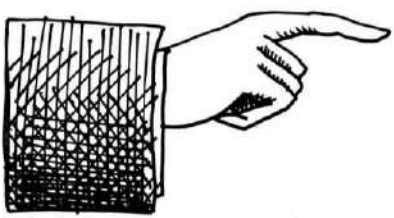
A "FORÇA CENTRÍFUGA" É FICTÍCIA!

A ÚNICA FORÇA AGINDO NA BOLA É EXERCIDA PELO FIO, PUXANDO-A PARA O CENTRO, OU SEJA UMA FORÇA **CENTRÍPETA**. ESTA SIM EXISTE E NÃO É NULA, POR ISSO A BOLA ESTÁ ACELERADA.

DE FATO, ELA ESTÁ ACELERADA PARA O CENTRO; COMO ALIÁS QUALQUER CORPO EM MOVIMENTO CIRCULAR. MAS, O QUE MANTÉM O FIO ESTICADO? A **INÉRCIA** DA BOLA. POR INÉRCIA ELA ESCAPARIA TANGENCIALMENTE, MAS O FIO PUXA-A CONTÍNUAMENTE PARA DENTRO, ASSIM COMO A TERRA PUXANDO A LUA PARA UMA ÓRBITA CIRCULAR.

UM PARQUE DE DIVERSÕES OFERECE VÁRIOS EXEMPLOS DE FORÇAS FICTÍCIAS. VEJA O **ROTOR**: AS PESSOAS ENTRAM NUM CILINDRO, QUE RODA, PRESSIONANDO-AS CONTRA A PAREDE. ENTÃO O CHÃO SE DESPREENDE MAS AS PESSOAS NÃO CAEM POIS FICAM GRUDADAS NA PAREDE!

OS QUE ESTÃO DENTRO DO ROTOR SENTEM A FORÇA **CENTRÍFUGA** FICTÍCIA QUE OS EMPURRA PRA FORA! MAS OS OBSERVADORES FORA SABEM QUE O QUE HÁ É UMA FORÇA **CENTRÍPETA** DA PAREDE, CONDUZINDO AS PESSOAS A UMA TRAJETÓRIA CIRCULAR.



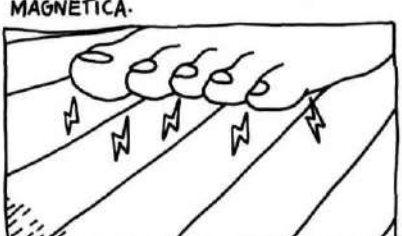
NUM SISTEMA ACELERADO (NESTE CASO, EM ROTAÇÃO) "SURGEM" VÁRIOS TIPOS DE FORÇAS FICTÍCIAS. UM OBSERVADOR NÃO ACELERADO, POR SUA VEZ, PODE EXPLICAR OU DESCREVER TODOS OS MOVIMENTOS COM BASE EM FORÇAS REAIS E NAS LEIS DE NEWTON.

HÁ UMA TAL VARIEDADE DE FORÇAS, QUE PARECE INÚTIL TENTAR ORGANIZÁ-LAS. OS FÍSICOS MOSTRARAM, CONTUDO, QUE TODOS OS EFEITOS CONHECIDOS SÃO RESULTADO DE NÃO MAIS QUE

(3 ou) 4 FORÇAS BÁSICAS:

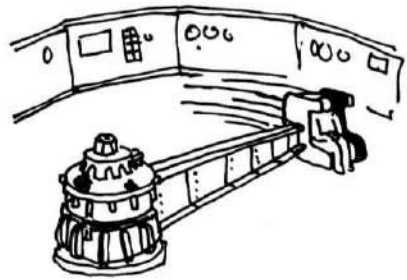
GRAVIDADE
FORÇA ELETROMAGNÉTICA (ATRAÇÃO E REPULSÃO DE CORPOS ELETRICAMENTE CARREGADOS):
FORÇA SUBATÔMICA FRACA*:
β⁻
FORÇA NUCLEAR FORTE QUE MANTÉM O NÚCLEO COESO:

DIGA-SE DE PASSAGEM, A ÚNICA DESSAS FORÇAS BÁSICAS QUE VOCÊ REALMENTE JÁ SENTIU FOI A ELETROMAGNÉTICA. SE VOCÊ EMPURRA ALGO (E ESTE ALGO, PELA REAÇÃO, O EMPURRA) O QUE VOCÊ SENTE NAS MÃOS É A REPULSÃO INTERATÔMICA, VOCÊ, DE FATO, NUNCA SENTIU A GRAVIDADE, MAS SÓ A REAÇÃO DO SOLO NOS PÉS; DE NOVO REPULSÃO INTERATÔMICA, ELETROMAGNÉTICA.

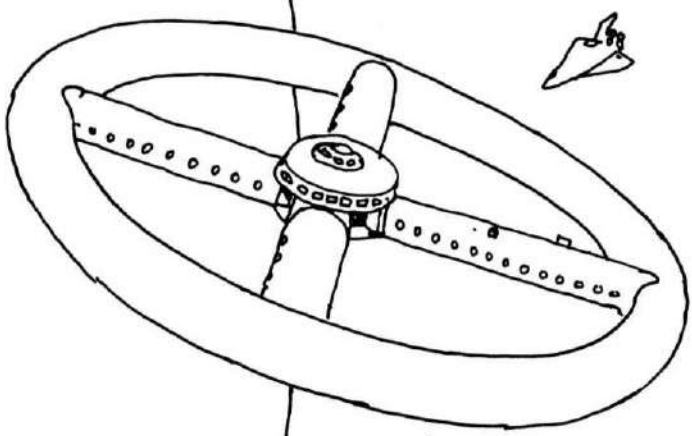


* **N. do T.**: MOSTROU-SE HÁ ALGUNS ANOS QUE ESSA FORÇA E A ELETROMAGNÉTICA SÃO, NO FUNDO, A MESMA, QUE PODE SER CHAMADA DE "ELETROFRACA". COM ISSO, SÃO 3 E NÃO MAIS 4 AS FORÇAS BÁSICAS!!!

A "FORÇA CENTRÍFUGA" LEMBRA A GRAVIDADE POR PRODUZIR ACELERAÇÕES INDEPENDENTES DAS MASSAS ENVOLVIDAS. É POR ISSO QUE SE PODE SIMULAR GRAVIDADE COM ESTA GRANDE CENTRIFUGADORA USADA NO TREINAMENTO DE ASTRONAUTAS:



ALGUM DIA, AINDA CONSTRUIREMOS UMA ESTAÇÃO ESPACIAL ROTATIVA COM A "FORÇA CENTRÍFUGA" PROVANDO A GRAVIDADE ARTIFICIAL.



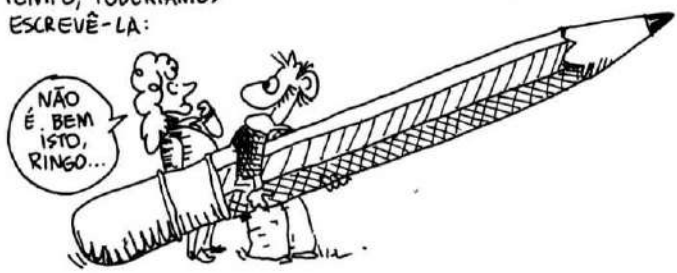
DIMINUA A ROTAÇÃO, QUE EU ESTOU QUERENDO PERDER PESO...

◊CAPÍTULO 8◊

QUANTIDADE DE MOVIMENTO E IMPULSO

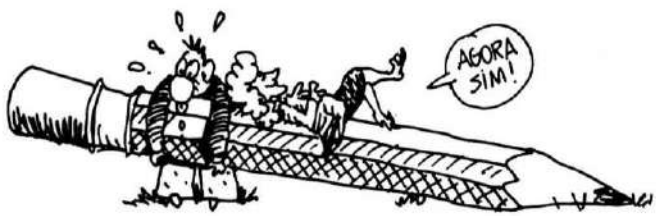
VOLTEMOS À SEGUNDA LEI DE NEWTON, $F = ma$. SENDO A ACELERAÇÃO A TAXA DE VARIAÇÃO DA VELOCIDADE COM O TEMPO, PODERÍAMOS ESCREVÊ-LA:

FORÇA = massa × (taxa temporal de variação da velocidade)



ACONTECE QUE NEWTON ACREDITAVA QUE A FORMA CORRETA DA EQUAÇÃO SERIA:

FORÇA = Taxa temporal de variação do produto "massa x velocidade"



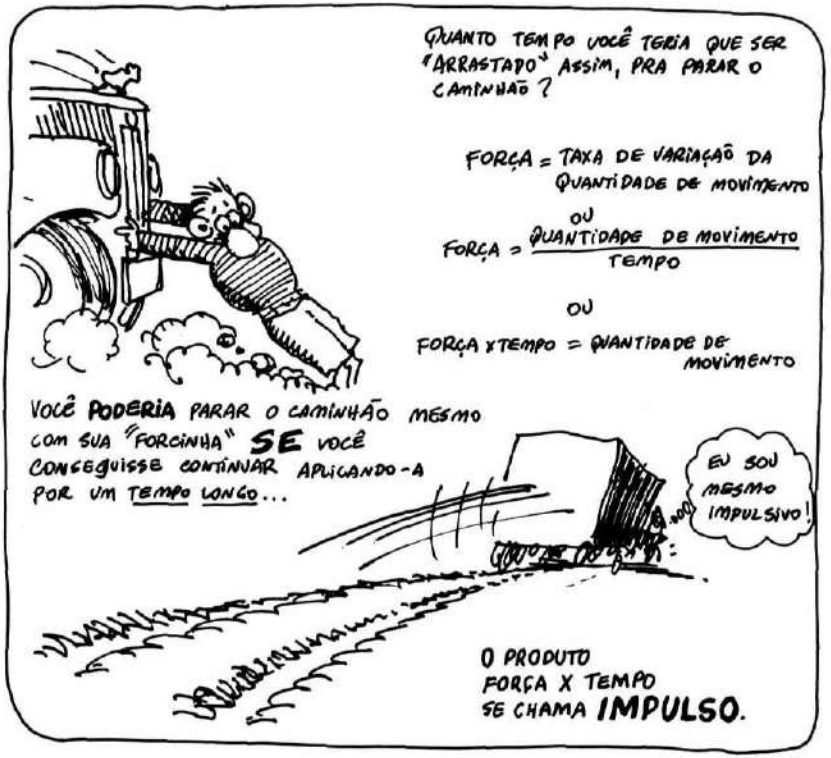
QUE RESULTA NA MESMA EQUAÇÃO, SE A MASSA NÃO VARIAR!

DENOMINAMOS O PRODUTO MASSA X VELOCIDADE DE **QUANTIDADE DE MOVIMENTO.*** A EQUAÇÃO QUE ACABAMOS DE ESCREVER DIZ QUE A FORÇA DEPENDE DA TAXA DE VARIAÇÃO DA GRAVIDADE DE MOVIMENTO.

UM OBJETO DE MASSA PEQUENA E VELOCIDADE MODERADA, COMO UM CARRINHO DE BEBÊ DESGOVERNADO, TEM UMA QUANTIDADE DE MOVIMENTO MODERADA; POR ISSO NÃO É PRECISO GRANDE FORÇA PARA REDUZI-LA A ZERO (OU SEJA, PARA PARAR O CARRINHO).

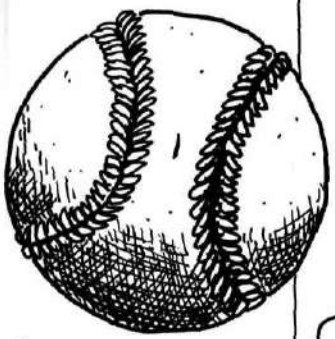
JÁ UMA CARRETA DESGOVERNADA...

*N. do T.: TAMBÉM DENOMINADO MOMENTO LINEAR


QUANTO TEMPO VOCÊ TERIA QUE SER "ARRASTADO" ASSIM, PRA PARAR O CAMINHÃO?
FORÇA = TAXA DE VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO
OU
FORÇA = QUANTIDADE DE MOVIMENTO / TEMPO
OU
FORÇA X TEMPO = QUANTIDADE DE MOVIMENTO
VOCÊ PODERIA PARAR O CAMINHÃO MESMO COM SUA "FORCINHA" SE VOCÊ CONSEGUISSE CONTINUAR APLICANDO-A POR UM TEMPO LONGO...
EU SOU MESMO IMPULSIVO!
O PRODUTO FORÇA X TEMPO SE CHAMA IMPULSO.

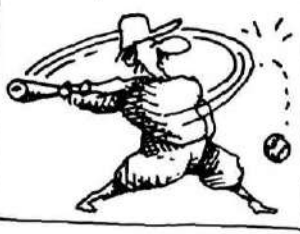
ENTÃO, IMPULSO = MUDANÇA NA QUANTIDADE DE MOVIMENTO. UMA PEQUENA FORÇA APLICADA POR UM TEMPO LONGO PRODUZ A MESMA MUDANÇA NA QUANTIDADE DE MOVIMENTO QUE UMA FORÇA GRANDE APLICADA POR UM PERÍODO CURTO DE TEMPO.
PUTS! ESQUENTOU MEU PÉ...
?

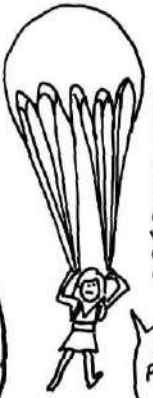
GERALMENTE A GENTE PENSA EM IMPULSO COMO UMA FORÇA GRANDE NUM TEMPO CURTO, COMO UM CHUTE OU UMA TACADA NUMA BOLA.



O JOGADOR TEM DE MUDAR A QUANTIDADE DE MOVIMENTO DA BOLA, QUE CHEGA DEVAGAR NUM SENTIDO E DEVE PARTIR RAPIDAMENTE NO SENTIDO OPOSTO. O TEMPO DO TOQUE É CURTO; PORTANTO, A FORÇA DEVERIA SER GRANDE.

DEVERIA...





BOA PRA QUEM?

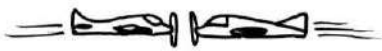
ÀS VEZES, O QUE SE QUER É USAR A MÍNIMA FORÇA POSSÍVEL PARA A VARIAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO. NUM SALTO COM PÁRA-QUEDAS CHEGA-SE AO CHÃO COM UMA VELOCIDADE RAZOÁVEL, OU SEJA, A GENTE TOCA O CHÃO COM UMA BOA QUANTIDADE DE MOVIMENTO.

SE A GENTE FICASSE DE "PERNA DURA" PODERIA SE MACHUCAR, POIS A QUANTIDADE DE MOVIMENTO MUDARIA ABRUPTAMENTE, OU SEJA, A GENTE RECEBERIA UMA ENORME FORÇA NAS PERNAS.

POR ISSO, O CERTO É DOBRAR O JOELHO E TAMBÉM ROLAR PROLONGANDO O TEMPO DE IMPACTO E, PORTANTO, REDUZINDO A FORÇA QUE A GENTE RECEBE.

CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

OBSERVEMOS COLISÕES E EXPLOSÕES, OU SEJA, SITUAÇÕES ONDE COISAS SE APROXIMEM E SE ENCONTREM OU SE FRAGMENTEM, ESPALHANDO-SE.

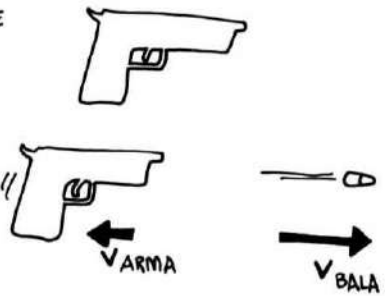


COLISÃO E EXPLOSÃO PRONTAS PARA ACONTECER!

QUALQUER TIRO, MESMO COM "MIRA", É UMA EXPLOSÃO, NO SENTIDO MAIS GERAL, POIS A BALA VAI PARA UM LADO E A ARMA RECUA PARA O LADO OPOSTO.

QUANDO A MOLA É LIBERADA, ELA EXERCE UMA FORÇA NA BALA. PELA TERCEIRA LEI DE NEWTON, A BALA EXERCE FORÇA EQUIVALENTE E OPOSTA SOBRE A ARMA. ESSAS FORÇAS OPOSTAS TAMBÉM PROMOVEM VARIAÇÕES OPOSTAS NAS QUANTIDADES DE MOVIMENTO DA BALA E DA ARMA. SENDO A ARMA MAIS MASSIVA, ELA RECUA COM VELOCIDADE BEM MENOR QUE A DA BALA, AINDA QUE COM QUANTIDADE DE MOVIMENTO EQUIVALENTE.

NESSE CASO, NÃO HOUVE MUDANÇA GLOBAL DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO. SE A ARMA E A BALA ESTAVAM PARADAS ANTES, ERA ZERO A QUANTIDADE DE MOVIMENTO INICIALMENTE. COMO SOLTAR A MOLA NÃO PRODUZ VARIAÇÃO NA QUANTIDADE DE MOVIMENTO TOTAL, ESTA SE MANTÉM NULA: A ARMA E A BALA TÊM QUANTIDADES DE MOVIMENTOS IGUAIS E OPOSTAS, QUE SE CANCELAM!



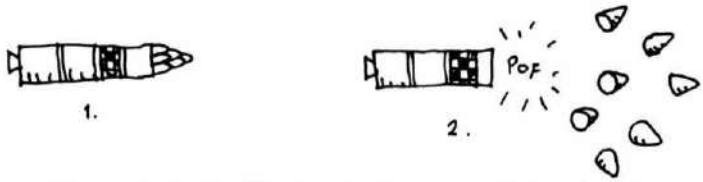
A QUANTIDADE DE MOVIMENTO É A MESMA, ANTES E DEPOIS DO TIRO.

ENTÃO A QUANTIDADE DE MOVIMENTO NUNCA MUDA?
QUANTIDADE DE MOVIMENTO NÃO VARIA?
QUANTIDADE DE MOVIMENTO NÃO É COMO MERCADO DE AÇÕES?
QUANTIDADE DE MOVIMENTO É PARA SEMPRE?
ENTÃO ELA NÃO INTERESSA?
VAI VER QUE É POR PREGUIÇA!
SERÁ COMO A MORTE?
SÓ DUAS COISAS SÃO ABSOLUTAMENTE CERTAS: A MORTE E A QUANTIDADE DE MOVIMENTO!

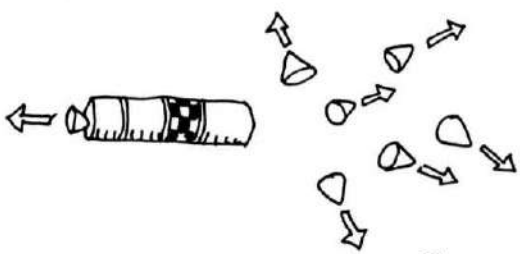
DEPOIS DE DISCUTIREM UM POUCO, OS CIENTÍSTAS ACHARAM UMA MANEIRA CIENTIFICAMENTE APROPRIADA DE DIZER QUE A QUANTIDADE DE MOVIMENTO NÃO MUDA:

A QUANTIDADE DE MOVIMENTO É CONSERVADA.

A CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO É UMA CONSEQÜÊNCIA DA TERCEIRA LEI DE NEWTON. VEJA UM FOGUETE QUE EXPLODE EM VÁRIAS PARTES, COMO UM MÍSSIL DE OGIVA MÚLTIPLA:



AS FORÇAS ENTRE AS PARTES CHAMAM-SE FORÇAS **INTERNAS** (PODEM ESTAR PRESENTES TAMBÉM FORÇAS EXTERNAS COMO A GRAVIDADE). PELA TERCEIRA LEI, AS FORÇAS INTERNAS AGEM EM PARES IGUAIS E OPOSTOS, DE FORMA QUE A FORÇA EM CADA PARTE É "COMPENSADA" POR UMA FORÇA OPOSTA NOUTRA PARTE.

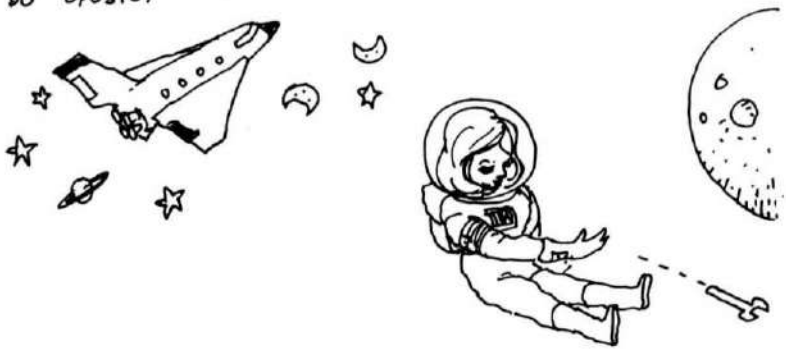


A "COMPENSAÇÃO" DE TODAS ESTAS FORÇAS RESULTA NUMA SOMA NULA!

PORTANTO, AS FORÇAS INTERNAS **NÃO** PRODUZEM QUALQUER **VARIAÇÃO NA QUANTIDADE DE MOVIMENTO TOTAL** (AINDA QUE TENHA VARIADO A DE CADA PARTE) EXPLOSÕES CONSERVAM A QUANTIDADE DE MOVIMENTO.

O MESMO VALE PARA COLISÕES, QUE PODEM SER CONSIDERADAS COMO O REVERSO DE EXPLOSÕES.

JÁ USAMOS UM FOGUETE PARA ILUSTRAR A TERCEIRA LEI DE NEWTON, PORTANTO ELE TAMBÉM PODE ILUSTRAR A CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO. PARA ACELERAR, NO ESPAÇO SIDERAL, É PRECISO EJETAR ALGO NO SENTIDO OPOSTO AO QUE SE QUER IR, E ISSO É FEITO PELA EXAUSTÃO DO COMBUSTÍVEL QUEIMADO. SE EU SAIO DA NAVE E MINHA PROPULSÃO PESSOAL FALHA, COMO POSSO VOLTAR À NAVE? ATIRANDO ALGO, COMO AS MINHAS FERRAMENTAS, NO SENTIDO OPOSTO.



SERÁ QUE O VENTILADOR NO BARCO SOPRANDO A VELA CONSEGUE MOVÊ-LA? NÃO! (A MENOS QUE, P. EX., A VELA ESTIVESSE RASGADA...)

ALGO TERIA DE SER LANÇADO FORA DO BARCO NUMA DIREÇÃO PARA O BARCO PODER IR NA OUTRA.

A CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO FOI DEDUZIDA DA TERCEIRA LEI DE NEWTON, MAS PODEMOS MESMO CONSIDERAR QUE A CONSERVAÇÃO É A LEI MAIS FUNDAMENTAL, SENDO A LEI DE NEWTON CONSEQÜÊNCIA DELA. EM QUALQUER SISTEMA FECHADO NÃO HÁ FORÇAS EXTERNAS (OU NÃO SERIA FECHADO...); PORTANTO, NELE SE CONSERVA A QUANTIDADE DE MOVIMENTO.

ISSO É VERDADE PARA O UNIVERSO COMO UM TODO: OBVIAMENTE NÃO HÁ FORÇAS EXTERNAS AO UNIVERSO!!

PORTANTO... **A QUANTIDADE DE MOVIMENTO NO UNIVERSO É CONSTANTE.**

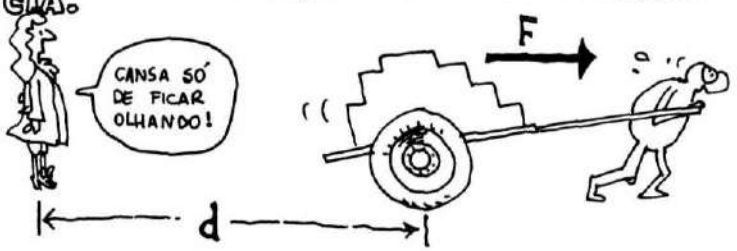
‹CAPÍTULO 9›
ENERGIA

ISAAC NEWTON INVENTOU A MECÂNICA QUASE TODA SOZINHO. MAS HÁ UMA COISA QUE ELE NÃO IMAGINAVA: **A ENERGIA**

A ENERGIA APARECE EM MUITAS FORMAS, MAS SUA DEFINIÇÃO BÁSICA É EM TERMOS DE

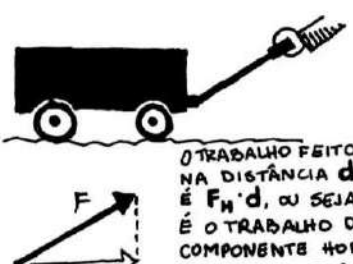
TRABALHO.

TODOS TEMOS UM CONCEITO DE TRABALHO. MAS EM FÍSICA A DEFINIÇÃO É PRECISA: DIZEMOS QUE SE REALIZA TRABALHO QUANDO UMA FORÇA **F** MOVE UM CORPO AO LONGO DE UMA DISTÂNCIA **d**. O TRABALHO É ESSA **FORÇA VEZES ESSA DISTÂNCIA**.

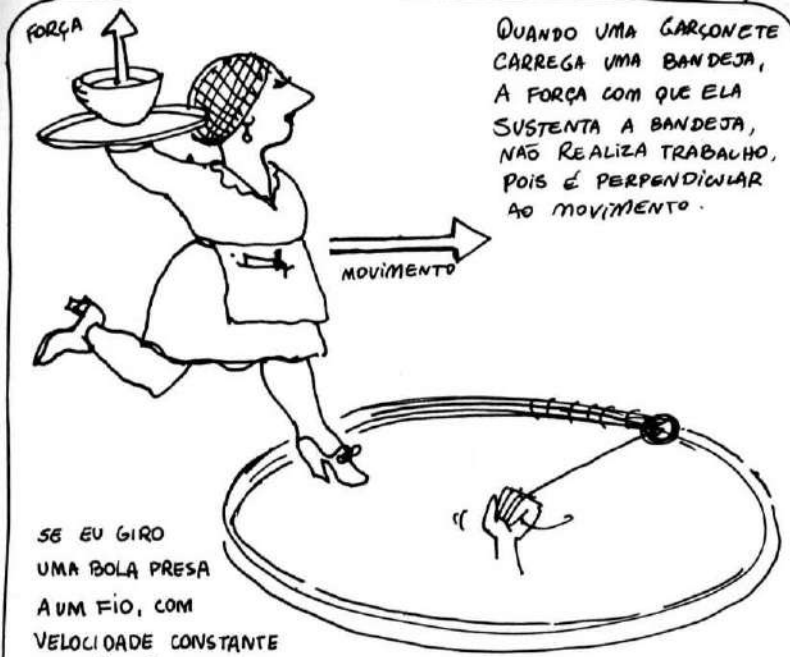


$$W = F \times d$$

NESSA DEFINIÇÃO, SÓ CONTA A FORÇA NA DIREÇÃO DO DESLOCAMENTO. SE A GENTE PUXA UM CARRINHO COM A FORÇA FAZENDO UM ÂNGULO COM A HORIZONTAL, PARTE DO PUXÃO NÃO OPERA, NÃO TRABALHA.

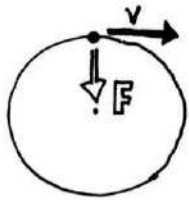


O TRABALHO FEITO NA DISTÂNCIA **d** É $F_H \cdot d$, OU SEJA, É O TRABALHO DA COMPONENTE HORIZONTAL DA FORÇA.



QUANDO UMA GARÇONETE CARREGA UMA BANDEJA, A FORÇA COM QUE ELA SUSTENTA A BANDEJA, NÃO REALIZA TRABALHO, POIS É PERPENDICULAR AO MOVIMENTO.

SE EU GIRO UMA BOLA PRESA A UM FIO, COM VELOCIDADE CONSTANTE TAMBÉM NÃO SE REALIZA TRABALHO. A FORÇA PARA DENTRO É PERPENDICULAR À VELOCIDADE (TANGENCIAL) DA BOLA. É CLARO QUE TIVE DE FAZER TRABALHO PARA PÔR A BOLA EM MOVIMENTO, NO INÍCIO.



ISSO MOSTRA, ALIÁS, QUE COMO A ÓRBITA DA LUA É CIRCULAR, A TERRA NÃO EXECUTA TRABALHO SOBRE A LUA, POIS A GRAVITAÇÃO É PERPENDICULAR AO MOVIMENTO.

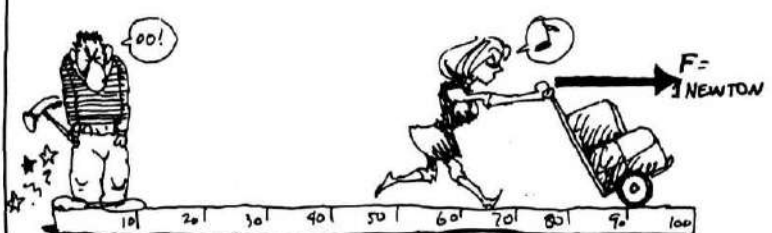
A ENERGIA

É DEFINIDA COMO A CAPACIDADE DE PRODUZIR TRABALHO. A LIBERAÇÃO DA ENERGIA REALIZA TRABALHO. REALIZANDO TRABALHO SOBRE ALGUMA COISA, ESTA RECEBE ENERGIA. POR TUDO ISSO, ENERGIA E TRABALHO SÃO **CONCEITOS EQUIVALENTES** E ESCREVEMOS:

$$E = W = F \times d. \quad *$$

USAM-SE MUITAS UNIDADES DIFERENTES PARA MEDIR ENERGIA, COMO A CALORIA, DA FÍSICA TÉRMICA, OU O QUILOWATT-HORA, DERIVADO DA UNIDADE DE POTÊNCIA. A UNIDADE MAIS SIMPLES, PARA SE ENTENDER, DECORRE JUSTAMENTE DA DEFINIÇÃO DE TRABALHO. NO SISTEMA MÉTRICO É O **JOULE: 1 NEWTON X 1 METRO**. OU SEJA,

1 J CORRESPONDE À FORÇA DE 1 N EXERCIDA AO LONGO DE 1 m.



* N. do T.: TRABALHO EM ALEMÃO E INGLÊS SE ESCREVE WERKE E WORK, RESPECTIVAMENTE, DAÍ A LETRA W, ADOTADA TAMBÉM EM PORTUGUÊS.

ENERGIA CINÉTICA & ENERGIA POTENCIAL

EU REALIZO TRABALHO AO LANÇAR UMA BOLA: EXERÇO UMA FORÇA **F** AO LONGO DE UMA DISTÂNCIA **d**. A BOLA ENTÃO ADQUIRE UMA ENERGIA, A ENERGIA DE MOVIMENTO OU **ENERGIA CINÉTICA** UM CÁLCULO MATEMÁTICO * SIMPLES MOSTRA QUE $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ ONDE m É A MASSA DA BOLA E V, SUA VELOCIDADE.

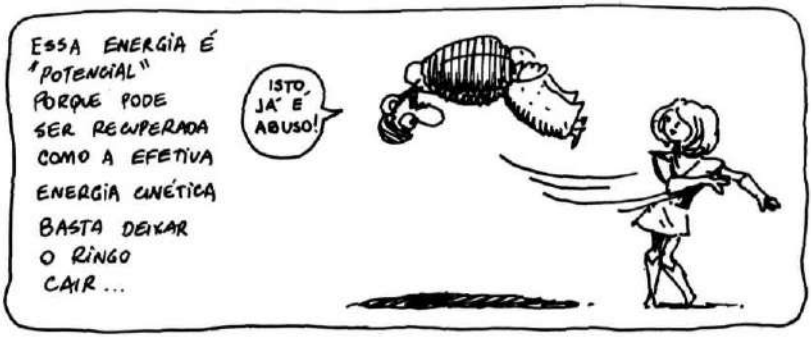
AGORA, PARA ERGUER O RINGO A UMA ALTURA **h**, PRECISO EXERCER A FORÇA **P**, IGUAL AO PESO **(mg)** DO RINGO, POR UMA DISTÂNCIA **h**.

REALIZO UM TRABALHO **Ph = mgh**. AO FINAL, RINGO NÃO ESTÁ SE MOVENDO, MAS SUA ENERGIA CRESCEU DE **mgh** PORQUE ELE ESTÁ NO CAMPO GRAVITACIONAL DA TERRA. ESSA É CHAMADA

ENERGIA POTENCIAL

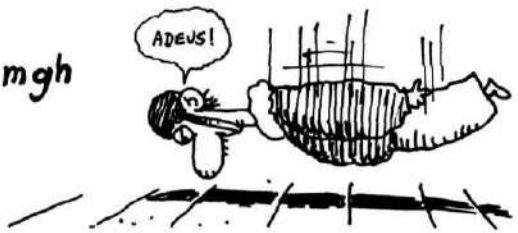
$E_p = mgh$.

* N.do T.: $E_c = W = F \cdot d = m \cdot a \cdot d$. SE F FOR CONSTANTE, $d = \frac{1}{2}at^2$ E $V = at$. ENTÃO, $E_c = \frac{1}{2}mat^2 = \frac{1}{2}mv^2$


ESSA ENERGIA É "POTENCIAL" PORQUE PODE SER RECUPERADA COMO A EFETIVA ENERGIA CINÉTICA
BASTA DEIXAR O RINGO CAIR...
ISTO JÁ É ABUSO!

À MEDIDA QUE ELE VAI CAINDO, SUA ENERGIA POTENCIAL É GRADUALMENTE CONVERTIDA EM ENERGIA CINÉTICA. IMEDIATAMENTE ANTES DO IMPACTO, ELE SÓ TERÁ ENERGIA CINÉTICA, POIS TODA A ENERGIA POTENCIAL TERÁ SIDO CONVERTIDA. OU SEJA

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$



DE ONDE SE PODE CALCULAR A VELOCIDADE DE IMPACTO

$$V = \sqrt{2gh}.$$

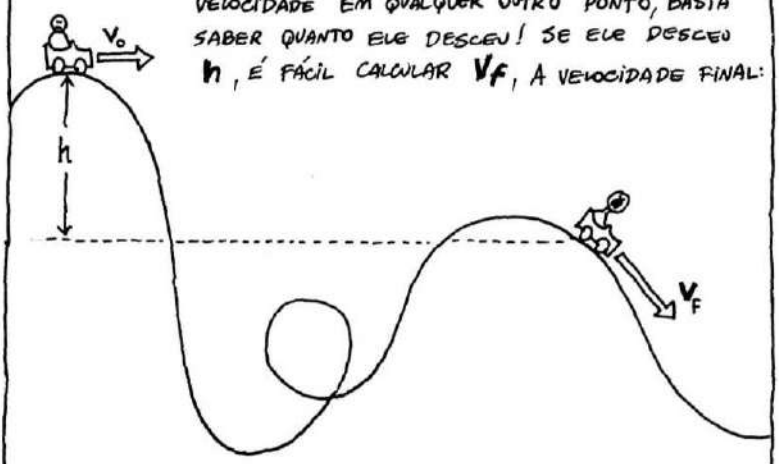
A IGUALDADE $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ É UM EXEMPLO DE

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.

À MEDIDA QUE FOI SE ESTABELECENDO O CONCEITO DE ENERGIA, OS FÍSICOS FORAM PERCEBENDO QUE A ENERGIA TAMBÉM SE CONSERVA, COMO A QUANTIDADE DE MOVIMENTO.

(A PARTE MAIS COMPLICADA É QUE, DIFERENTEMENTE DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO, A ENERGIA APARECE SOB MUITOS DISFARCES, COMO O CALOR, POR EXEMPLO.)

VEJAMOS UMA "APLICAÇÃO" DA ENERGIA. SE V_0 É A VELOCIDADE INICIAL DO CARRINHO NA MONTANHA RUSSA, PODEMOS CALCULAR A VELOCIDADE EM QUALQUER OUTRO PONTO, BASTA SABER QUANTO ELE DESCEU! SE ELE DESCEU h, É FÁCIL CALCULAR V_f, A VELOCIDADE FINAL:



ENERGIA INICIAL $= \frac{1}{2}mV_0^2 + mgh$

ENERGIA FINAL $= \frac{1}{2}mV_F^2$

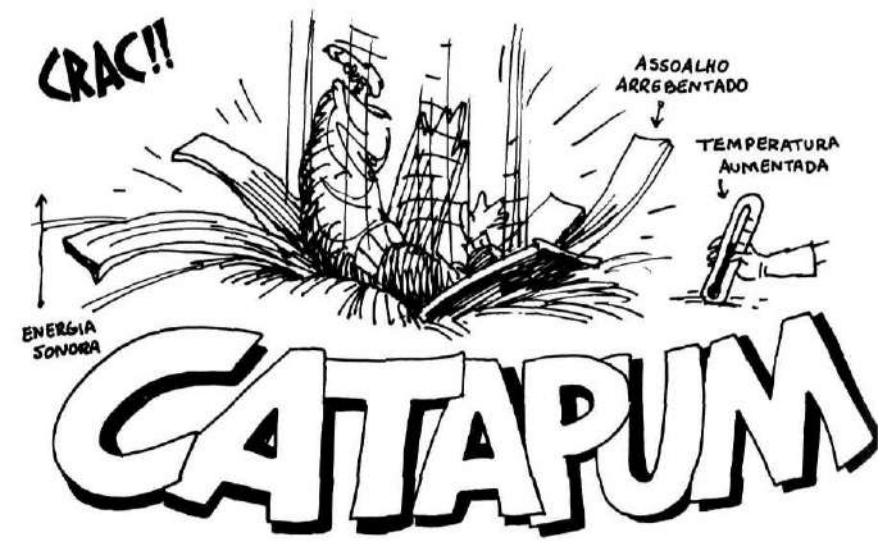
ELAS SÃO IGUAIS, PELA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.

$\frac{1}{2}mV_F^2 = \frac{1}{2}mV_0^2 + mgh$, ASSIM

$$V_F = \sqrt{V_0^2 + 2gh}$$

A CONSERVAÇÃO DA ENERGIA ASSEGURA QUE NÃO VARIA A ENERGIA TOTAL DO SISTEMA, MAS A ENERGIA PODE SER CONVERTIDA EM OUTRAS FORMAS. SE RINGO BATER NO CHÃO, DESAPARECEM TANTO A ENERGIA POTENCIAL QUANTO A ENERGIA CINÉTICA DELE!

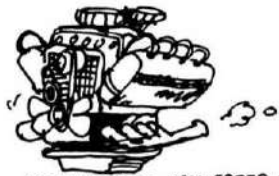
VEJAMOS O IMPACTO. PARTE DA ENERGIA É CONVERTIDA EM **SOM**. OUTRA PARTE, NA DEFORMAÇÃO DO ASSOALHO E, É ÓBVIO, TAMBÉM NA DEFORMAÇÃO DO RINGO.. ALGUMA, TALVEZ A MAIOR PARTE, É CONVERTIDA EM **CALOR**. O RINGO E O CHÃO ESTARÃO MAIS QUENTES APÓS A COLISÃO. O IMPACTO CHACOALHA AS MOLÉCULAS E O CALOR É A ENERGIA CINÉTICA DE BILHÕES DE MOLÉCULAS!!!



VÁRIAS FORMAS DE ENERGIA SE CONVERTEM NOUTRAS CONSTANTEMENTE. NA

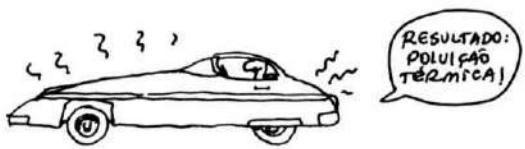
TERMODINÂMICA

APRENDEMOS QUE É FÁCIL CONVERTER TRABALHO, MOVIMENTO ORDENADO, EM CALOR. É BEM MAIS DIFÍCIL CONVERTER CALOR EM MOVIMENTO ORDENADO.



APARELHO PARA CONVERTER CALOR EM MOVIMENTO ORDENADO.

MOTORES A COMBUSTÃO CONVERTEM CALOR EM TRABALHO MECÂNICO, MAS NÃO EFICIENTEMENTE. O SISTEMA DE RESFRIAMENTO DO CARRO PÕE FORA MUITO CALOR. A ENERGIA, NO ENTANTO, É SEMPRE CONSERVADA, OU SEJA:



$$\text{CALOR QUE ENTRA} = \begin{cases} \text{TRABALHO PRODUZIDO} \\ + \\ \text{CALOR QUE SAI} \end{cases}$$

QUANDO EU ERGO O RINGO, EU LHE DOU ENERGIA. DE ONDE ELA VEM?

É "ENERGIA MUSCULAR" QUE É ENERGIA QUÍMICA PRODUZIDA PELA QUÍMICA DO ALIMENTO, EM MEU CORPO.

CÉLULAS DA LÍNGUA

A ENERGIA QUÍMICA É UMA FORMA DE ENERGIA POTENCIAL, DEVIDO À POSIÇÃO DOS ELÉTRONS NOS CAMPOS ELÉTRICOS DAS MOLÉCULAS.

NESSE CASO, A ENERGIA QUÍMICA VEIO DA PLANTA QUE EU COMI, QUE EU SOU VEGETARIANA...

A PLANTA CONVERTEU EM ENERGIA QUÍMICA A ENERGIA RADIANTE DO SOL, VIA FOTOSSÍNTESE.

A LUZ SOLAR, TODA A ENERGIA IRRADIADA PELO SOL, VEM DA FUSÃO NUCLEAR NO SOL.

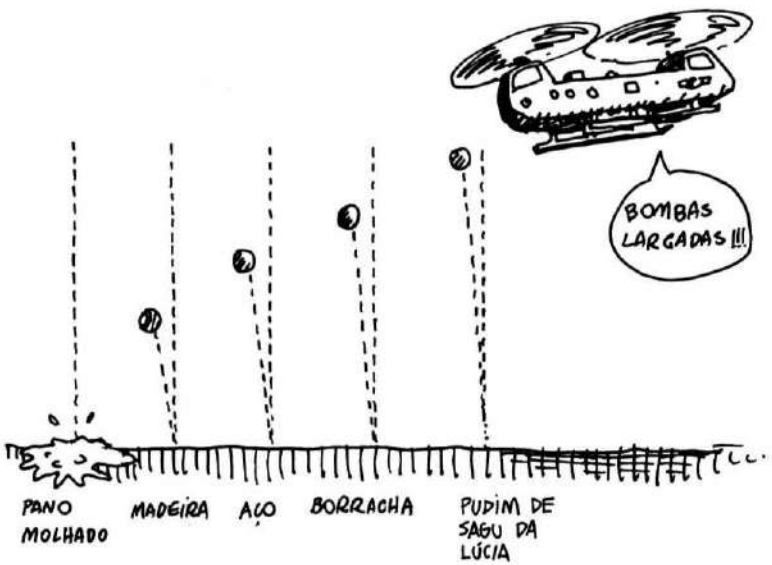
E O HIDROGÊNIO, QUE PARTICIPA DA FUSÃO NUCLEAR NO SOL, VEM, EM ÚLTIMA ANÁLISE, DO EVENTO DA CRIAÇÃO DO UNIVERSO, O

BIG BANG.

MESMO A ENERGIA QUE MOVE A MÃO DO DESENHISTA PODE TER SUA ORIGEM SEGUIDA ATÉ O "BIG BANG"!!!

◊CAPÍTULO 10◊
COLISÕES

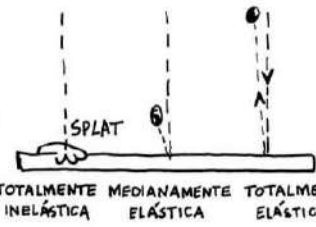
AS COLISÕES ILUSTRAM BEM AS CONSERVAÇÕES DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO E DA ENERGIA. COMECEMOS POR DEIXAR ALGUNS OBJETOS COLIDIR COM O CHÃO. OBJETOS DE DIFERENTES MATERIAIS BATEM E VOLTAM ATÉ ALTURAS DIFERENTES.



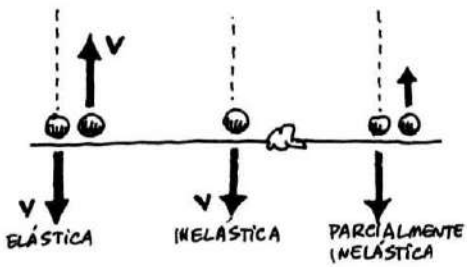
SE UMA BOLA RETORNA À MESMA ALTURA QUE TINHA AO SER LARGADA, DIZEMOS QUE ELA É

TOTALMENTE ELÁSTICA

AS COLISÕES VARIAM DE TOTALMENTE ELÁSTICAS ATÉ TOTALMENTE INELÁSTICAS. NUMA TOTALMENTE INELÁSTICA, NÃO HÁ NENHUM RETORNO, COMO NO PANO MOLHADO, LANÇADO DO HELICÓPTERO.

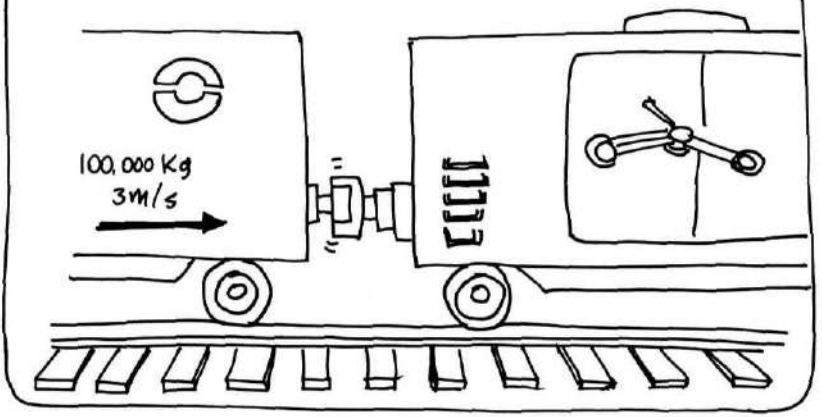


NUMA COLISÃO TOTALMENTE ELÁSTICA, NÃO HÁ PERDA DE ENERGIA CINÉTICA, EM CALOR, NO IMPACTO. A VELOCIDADE DE RETORNO É A MESMA DA CHEGADA. NUMA TOTALMENTE INELÁSTICA, A BOLA GRUDA, PERDENDO TODA ENERGIA CINÉTICA NO IMPACTO. NUMA COLISÃO PARCIALMENTE INELÁSTICA, PARTE DA ENERGIA CINÉTICA É PERDIDA NO IMPACTO E A BOLA ACABA PARANDO APÓS COLISÕES SUCESSIVAS.



VOCÊ TALVEZ PENSE QUE NENHUM OBJETO REAL É ABSOLUTAMENTE ELÁSTICO, MAS OS ÁTOMOS PODEM SER EM SUAS COLISÕES COMO CALOR É A ENERGIA CINÉTICA DESORDENADA DE MUITOS ÁTOMOS, O CALOR NÃO EXISTE AO NÍVEL DE UM MERO PAR DE ÁTOMOS.

EIS UMA COLISÃO TOTALMENTE INELÁSTICA: UM VAGÃO CARREGADO, COM CEM TONELADAS, ANDANDO A 3m/s, BATE NOUTRO DE 50 TONELADAS, PARADO, COM O QUAL SE ENGATA AO BATER (POR ISSO É INELÁSTICO). O QUE ACONTECE?



SOLUÇÃO: CHAMEMOS V À VELOCIDADE FINAL DOS VAGÕES ENGATADOS, ENTÃO:

QUANTIDADE DE MOVIMENTO INICIAL = $100.000\ Kg \times 3\ m/s$

QUANTIDADE DE MOVIMENTO FINAL = $150.000\ Kg \times V$

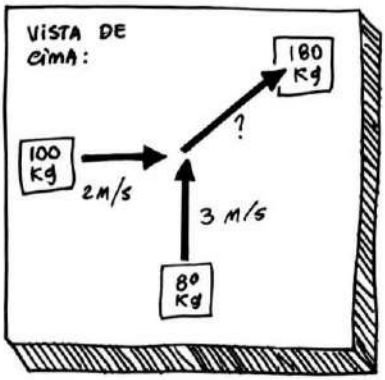
SENDO CONSERVADA A QUANTIDADE DE MOVIMENTO,

$$150.000\ kg.V = 300.000\ kg.m/s$$

PORTANTO,

$$V = 2\ m/s$$

Eis um exemplo em duas dimensões: Um jogador de futebol americano, com 80 Kg, corria a 3 m/s na direção Norte e foi "colhido" por um outro de 100 kg indo para Leste a 2 m/s. Após o impacto, em que direção eles acabam indo e em que velocidade?



QUANTIDADES DE MOVIMENTO...

PARA O NORTE = 200 M Kg/s

PARA O LESTE = 240 M Kg/s

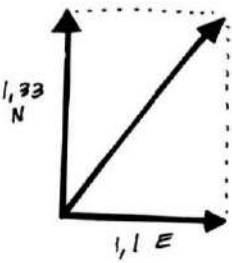
MASSA TOTAL = 180 Kg

PORTANTO:

$$\left.\begin{array}{l}\text{COMPONENTE}\\ \text{LESTE DA}\\ \text{VELOCIDADE}\\ \text{FINAL}\end{array}\right\} = \frac{200}{180} = 1,1 \text{ m/s}$$

$$\left.\begin{array}{l}\text{COMPONENTE}\\ \text{NORTE DA}\\ \text{VELOCIDADE}\\ \text{FINAL}\end{array}\right\} = \frac{240}{180} = 1,33 \text{ m/s}$$

A direção final é a do vetor soma:

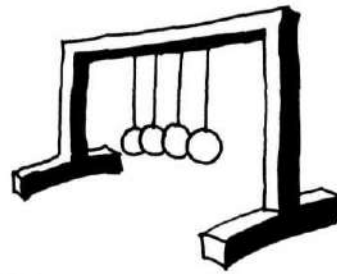


O comprimento do vetor velocidade final é:

$$V_f = \sqrt{(1,1)^2 + (1,33)^2}$$

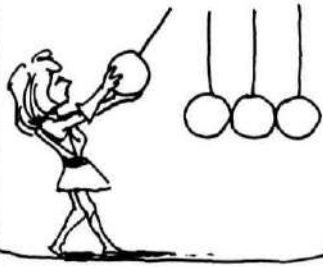
$$= 1,7 \text{ M/s}$$

O PÊNDULO DE COLISÃO ILUSTRA BEM CHOQUES ELÁSTICOS

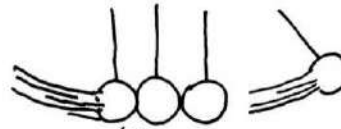


É BEM BOLADO...

SE A GENTE SOLTA UMA BOLA DE UM LADO...



...A BOLA DO OUTRO EXTREMO SALTA!



PLIN

A ENERGIA CINÉTICA É CONSERVADA, PORTANTO É ELÁSTICA A COLISÃO.

PORQUE NÃO SALTAM DUAS BOLAS COM A METADE DA VELOCIDADE? CONSERVARIA A QUANTIDADE DE MOVIMENTO, IGUALMENTE, POIS $MV = \frac{1}{2}MV + \frac{1}{2}MV$...

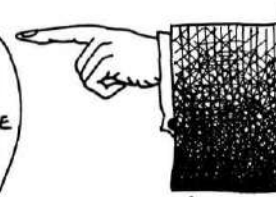
MAS NÃO CONSERVARIA A ENERGIA CINÉTICA, QUE INICIALMENTE ERA

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$ E AS DUAS BOLAS TERIAM

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{v}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}m\left(\frac{v}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}mv^2,$$

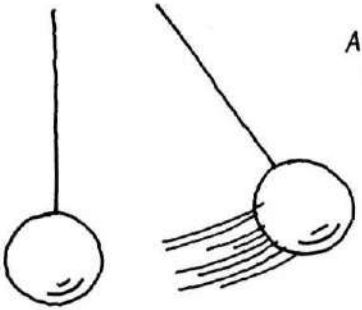
SÓ A METADE...

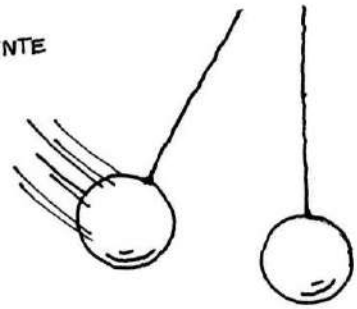
COLISÕES ELÁSTICAS CONSERVAM TANTO A QUANTIDADE DE MOVIMENTO **QUANTO** A ENERGIA



SERÁ QUE SÓ FUNCIONA COM 4 BOLAS?

SÓ COM DUAS BOLAS, A GENTE VÊ ATÉ MAIS CLARAMENTE O CHOQUE ELÁSTICO ENTRE MASSAS IGUAIS:





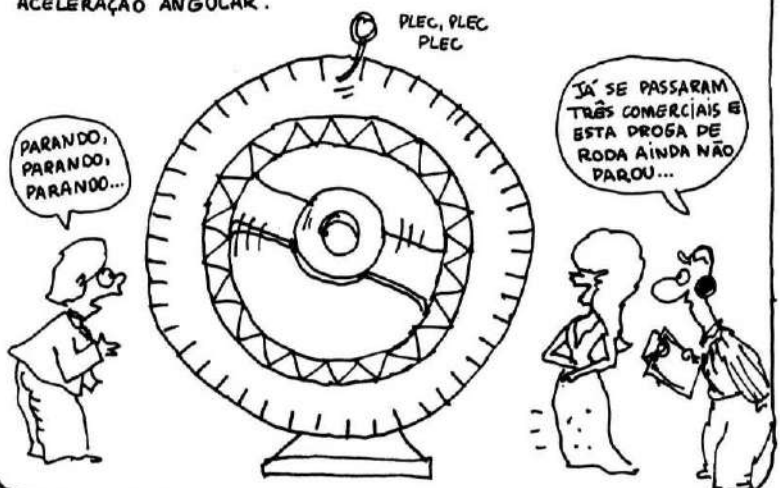
A BOLA QUE CHEGA BATE NA OUTRA E PÁRA COMPLETAMENTE, TRANSFERINDO À OUTRA TODA SUA ENERGIA CINÉTICA E SUA QUANTIDADE DE MOVIMENTO.

MAIS OU MENOS A MESMA SITUAÇÃO SE VE NA COLISÃO FRONTAL ENTRE BOLAS DE BILHARES. SÓ QUE, NESSE CASO, PARTE DA ENERGIA CINÉTICA ESTÁ NA ROTAÇÃO DAS BOLAS, O QUE LEVA À NOSSA PRÓXIMA SEÇÃO...

CAPÍTULO 11

ROTAÇÃO

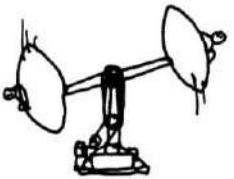
NÓS SABEMOS QUE UM OBJETO MASSIVO COMO UMA ROLETA POSSUI **MOMENTO DE INÉRCIA***. É PRECISO ALGUM ESFORÇO PARA PÔ-LA EM MOVIMENTO MAS, UMA VEZ COMEÇADO, O GIRO PROSSEGUE UM BOM TEMPO ANTES QUE O ATRITO A FAÇA PARAR. ASSIM COMO A INÉRCIA LINEAR RESISTE À ACELERAÇÃO LINEAR, O MOMENTO DE INÉRCIA RESISTE À ACELERAÇÃO ANGULAR.



*N. do T.: QUE TAMBÉM PODERIA SE CHAMAR INÉRCIA ROTACIONAL.

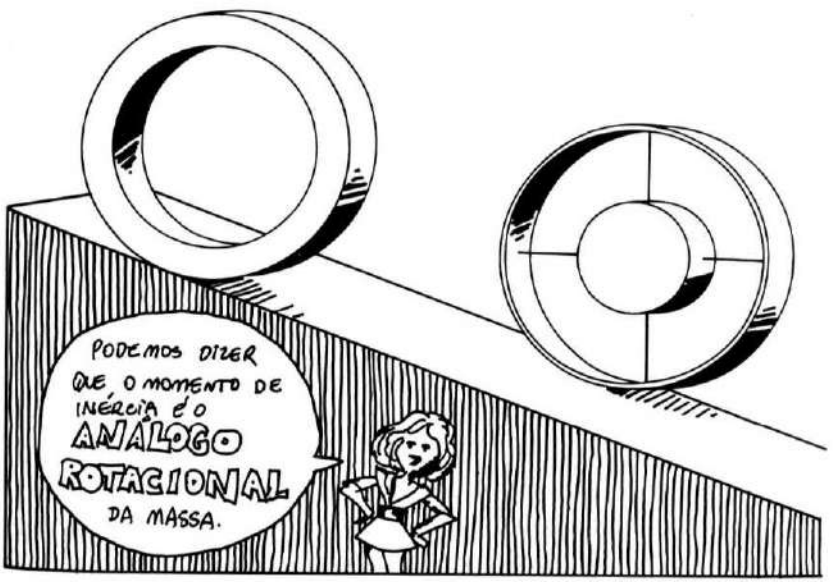
JÁ NOTOU QUE O MOMENTO DE INÉRCIA DEPENDE NÃO SÓ DA MASSA MAS TAMBÉM DE COMO A MASSA ESTÁ DISTRIBUÍDA? QUANTO MAIS LONGE DO CENTRO OU DO EIXO DE ROTAÇÃO ESTIVER A MASSA, MAIOR O MOMENTO DE INÉRCIA, AINDA QUE COM A MESMA MASSA!

MOMENTO DE INÉRCIA GRANDE



MOMENTO DE INÉRCIA PEQUENO

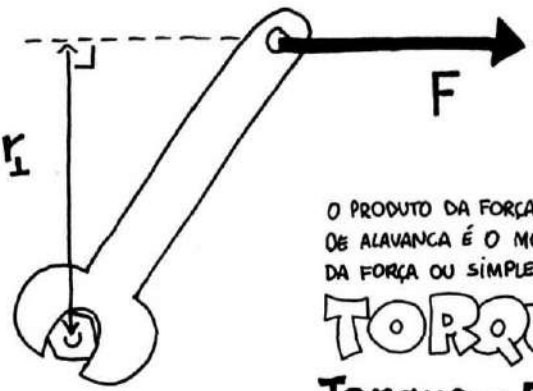
SE FIZERMOS UMA "CORRIDA" DE UMA RODA COM A MASSA TODA NA BORDA E OUTRA RODA COM MASSA CONCENTRADA NO INTERIOR, ESTA ÚLTIMA GANHA FÁCIL POIS, UM MOMENTO DE INÉRCIA MENOR, ACELERA MAIS E DESCE BEM MAIS RAPIDAMENTE QUE A OUTRA.



SE O MOMENTO DE INÉRCIA É O ANÁLOGO À MASSA, QUAL SERÁ O ANÁLOGO ROTACIONAL DA FORÇA? VEJA O RINGO QUE ABRE UMA PORTA MASSIVA, EMPURRANDO-A PERPENDICULARMENTE A ELA E TÃO LONGE QUANTO POSSÍVEL DA DOBRADIÇA.

O MESMO PRINCÍPIO SE APLICA QUANDO VOCÊ USA UMA CHAVE PARA REMOVER UMA PORCA. VOCÊ SEGURA A CHAVE NO PONTO MAIS DISTANTE DA PORCA E APLICA A FORÇA PERPENDICULAR À CHAVE.

CHAMEMOS $r_\perp$ À DISTÂNCIA PERPENDICULAR DO PONTO DE PIVÔ À LINHA DE FORÇA, OU SEJA, O **BRAÇO DE ALAVANCA.**



O PRODUTO DA FORÇA PELO BRAÇO DE ALAVANCA É O MOMENTO DE TORÇÃO DA FORÇA OU SIMPLESMENTE O

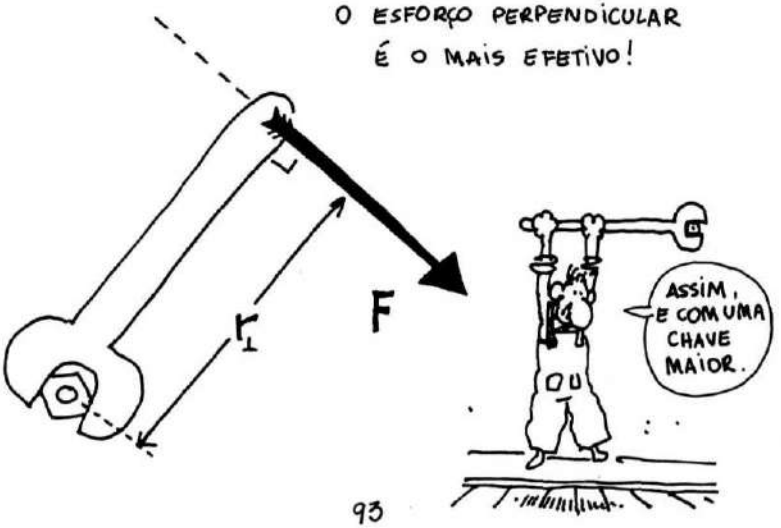
TORQUE.

$$\text{Torque} = F \cdot r_\perp .$$

TORQUE É O ANÁLOGO ROTACIONAL DA FORÇA.

NOTE QUE SE F FOR PERPENDICULAR AO RAIO (À CHAVE) $r_\perp$ SERÁ MÁXIMO. NOUTRAS PALAVRAS,

O ESFORÇO PERPENDICULAR É O MAIS EFETIVO!



HÁ AINDA OUTRO ANÁLOGO ANGULAR QUE É A

QUANTIDADE DE MOVIMENTO ANGULAR.*

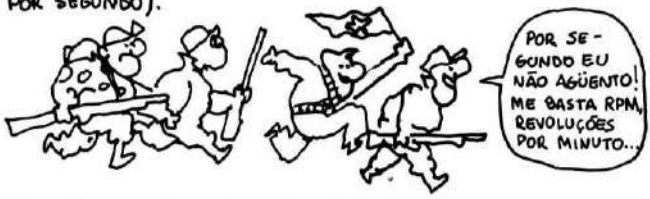
ANALOGAMENTE À QUANTIDADE DE MOVIMENTO LINEAR (MASSA x VELOCIDADE), A QUANTIDADE DE MOVIMENTO ANGULAR É O PRODUTO

MOMENTO DE INÉRCIA

x

VELOCIDADE ANGULAR

(VELOCIDADE ANGULAR É SIMPLESMENTE A TAXA DE GIRO; PODE SER EXPRESSA EM VOLTAS POR SEGUNDO OU, COMO SE COSTUMA DIZER, REVOLUÇÕES POR SEGUNDO).



DIFERENTEMENTE DA MASSA, O MOMENTO DE INÉRCIA PODE SER ALTERADO "EM PLENO VÔO" REARRANJANDO A MASSA. ISSO TORNA O MOVIMENTO DE ROTAÇÃO ALGO MAIS COMPLICADO. VEJAMOS A BAILARINA...

*N. do T.: TAMBÉM DENOMINADO MOMENTO ANGULAR.

A QUANTIDADE DE MOVIMENTO ANGULAR CONSERVA-SE NA AUSÊNCIA DE TORQUES EXTERNOS (ASSIM COMO A QUANTIDADE DE MOVIMENTO LINEAR, NA AUSÊNCIA DE FORÇAS EXTERNAS).

E SÓ ENTÃO ENCOLHE OS BRAÇOS; DIMINUI SEU MOMENTO DE INÉRCIA E, PARA QUE SE CONSERVE A QUANTIDADE DE MOVIMENTO, AUMENTA MUITO SUA VELOCIDADE ANGULAR!
UAU!

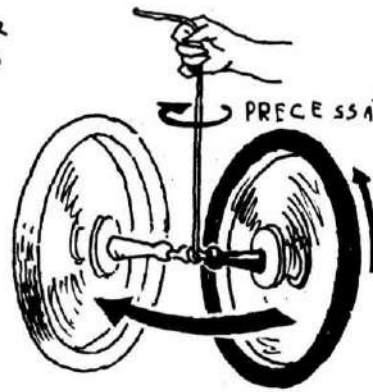
NESSE ASPECTO, A BAILARINA LEMBRA UMA ESTRELA GIRANTE QUE COLAPSA. AMBAS CONSERVAM A QUANTIDADE DE MOVIMENTO ANGULAR!

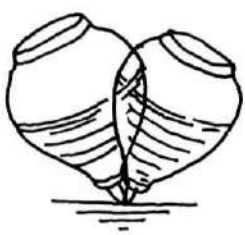
GRANDE MOMENTO DE INÉRCIA X GIRO VAGAROSO=

=PEQUENO MOMENTO DE INÉRCIA X GIRO RÁPIDO

O MOVIMENTO ROTACIONAL RESERVA-NOS ALGUMAS SURPRESAS. VEJAMOS! UMA RODA DE BICICLETA PARADA, OU SUSPENSA APENAS POR UM DOS EXTREMOS DE SEU EIXO, TOMBA DO LADO OPOSTO.

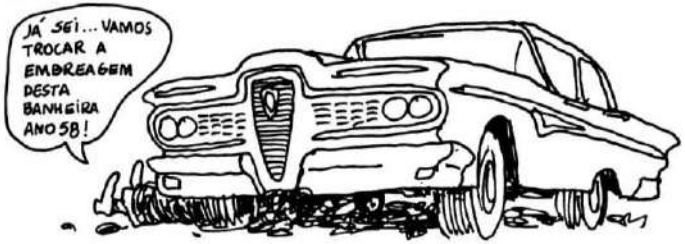
MAS NÃO SE ELA ESTIVER GIRANDO. ELA ENTÃO NÃO TOMBA, MAS SIM **PRECESSA!** QUER DIZER, SEU EIXO DÁ VOLTAS NO PLANO HORIZONTAL!





UM PIÃO DE BRINQUEDO É UM EXEMPLO BEM FAMILIAR DE ALGO QUE NÃO "CAI" POR GRAVIDADE MAS SIM PRECESSA... E O TORQUE NA TERRA CAUSADO PELA GRAVIDADE LUNAR FAZ O EIXO TERRESTRE PRECESSAR UMA REVOLUÇÃO A CADA 26.000 ANOS.

AGORA, VAMOS NOS SUBMETER AO TESTE MAIS EXIGENTE EM MATÉRIA DE CONHECIMENTO DE MECÂNICA...



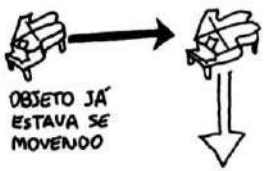
NÃO! VAMOS VER SE JÁ COMPREENDEMOS A PRECESSÃO... MAS ANTES, LEMBREMOS ALGO DO MOVIMENTO LINEAR: SE UMA FORÇA AGE SOBRE ALGO INICIALMENTE PARADO, A ACELERAÇÃO SERÁ SEMPRE NA DIREÇÃO DA FORÇA.

OBJETO EM DESCANSO

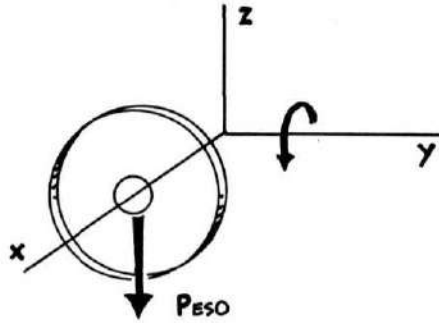
A FORÇA (DA GRAVIDADE) ATUA

VELOCIDADE AUMENTA NA DIRECÃO DA FORÇA

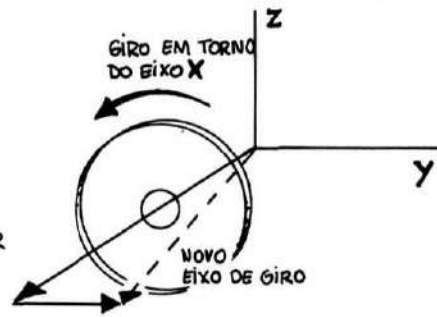
AGORA, SE O OBJETO JÁ ESTAVA SE MOVENDO E A FORÇA ESTIVESSE SEMPRE PERPENDICULAR AO MOVIMENTO, NÓS PRODUZIRÍAMOS **MOVIMENTO CIRCULAR UNIFORME**: A FORÇA "ENTORTARIA" A VELOCIDADE, SEM MUDAR SEU VALOR.


OBJETO JÁ ESTAVA SE MOVENDO
FORÇA AGINDO PERPENDICULAR AO MOVIMENTO
MUDA A DIREÇÃO, MAS NÃO A "RAPIDEZ"
FORÇA CONTÍNUA PERPENDICULAR
ETC.!

ALGO SEMELHANTE OCORRE NAS ROTAÇÕES: SE A RODA NÃO ESTÁ GIRANDO, O TORQUE DO PESO A ACELERA ANGULARMENTE EM TORNO DO EIXO DO TORQUE QUE, NESSE CASO, É O EIXO **Y**.



MAS SE A RODA JÁ ESTIVESSE GIRANDO, JÁ POSSUIRIA QUANTIDADE DE MOVIMENTO ANGULAR EM TORNO DO EIXO **X**. O TORQUE ACRESCENTARIA ALGUM GIRO EM TORNO DO EIXO **Y**, PERPENDICULAR AO DO GIRO ORIGINAL. O GIRO RESULTANTE É ALGO DEFLETIDO NO PLANO **X·Y**.

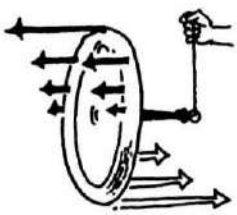


O TORQUE CONTINUA AGINDO PERPENDICULARMENTE AO EIXO DE GIRO; PORTANTO, PROSSEGUE A PRECESSÃO. ANALOGAMENTE AO CASO LINEAR, MUDA A DIREÇÃO MAS NÃO A INTENSIDADE DO GIRO.

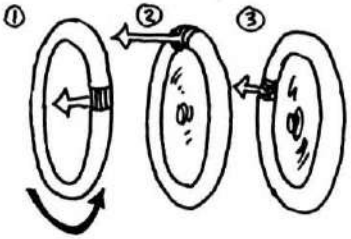
CLARO! NÃO É?

OS ARGUMENTOS DA PÁGINA ANTERIOR SÃO BASEADOS NOS CONCEITOS DE TORQUE E QUANTIDADE DE MOVIMENTO ANGULAR. EM ÚLTIMA ANÁLISE, ELES PODEM SER ATRIBUÍDOS À SEGUNDA LEI DE NEWTON. VEJAMOS SE OS COMPREENDEMOS COM BASE EM $F=ma$.

PRIMEIRO: O TORQUE EXERCIDO PELA GRAVIDADE TENDE A FAZER A RODA TOMBAR, POIS HÁ UMA FORÇA PARA FORA NO TOPO DA RODA E PARA BAIXO NA BASE.



AGORA OBSERVE UM PEQUENO SEGMENTO DA RODA GIRANDO; AO PASSAR PELO SEMICÍRCULO SUPERIOR EXPERIMENTA CONTÍNUA FORÇA PARA FORA.



PORTANTO, ELE ACELERA **PARA FORA**, ALCANÇANDO MÁXIMA VELOCIDADE PARA FORA AO ENTRAR NO SEMICÍRCULO INFERIOR.

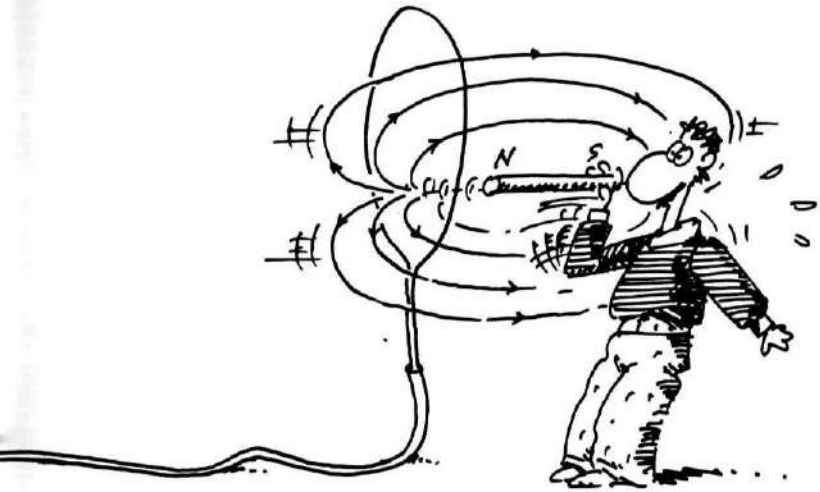
SIMILARMENTE, CADA SEGMENTO DA RODA TEM SUA VELOCIDADE MÁXIMA **PARA DENTRO** AO ALCANÇAR O INÍCIO DO SEMICÍRCULO SUPERIOR.

DAÍ, A RODA PRECESSAR E NÃO TOMBAR!

BEM, GASTEI TODO ESSE TEMPO EXPLICANDO PRECESSÃO SÓ PRA MOSTRAR COMO AS COISAS PODEM SE COMPLICAR, PARTINDO DE UMA SIMPLES $F=ma$. A FÍSICA É NOTÁVEL POR ISSO. QUEM SABE... POSSAMOS REDUZIR A FÍSICA DE TODO O UNIVERSO A UMA ÚNICA PÁGINA CHEIA DE EQUAÇÕES !!!

PÔ! ONDE É QUE EU FUI ENFIAR AQUELA LISTA DE FÓRMULAS?

•PARTE DOIS•
ELETRICIDADE E MAGNETISMO

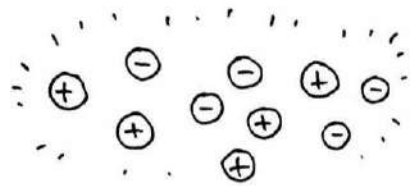


CAPÍTULO 12

CARGA

PASSAMOS AGORA DE MECÂNICA PARA ELETRICIDADE E MAGNETISMO. EM MECÂNICA USAMOS A PROPRIEDADE BÁSICA DA MATÉRIA, QUE CHAMAMOS **MASSA**. EM ELETRICIDADE O CONCEITO BÁSICO É **CARGA.**

CONCEITO MECÂNICO

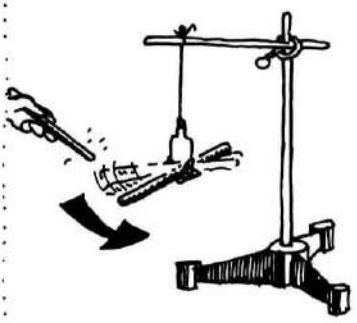


CONCEITO ELÉTRICO

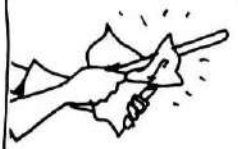
NOTE-SE QUE A MECÂNICA NÃO ESCLARECE O QUE A MASSA "REALMENTE É", MAS SOMENTE COMO ELA SE COMPORTA. DA MESMA FORMA, O ELETROMAGNETISMO CLÁSSICO NOS CONTA COMO SE COMPORTA A CARGA, MAS NÃO O QUE ELA É.

É FÁCIL GERAR UMA PEQUENA CARGA: PASSE UM PENTE DE LÁTEX NO SEU CABELO OU UM BASTÃO DE LÁTEX NA PELE DE UM ANIMAL.

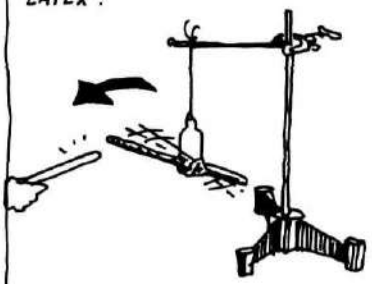
SE VOCÊ EQUILIBRAR O BASTÃO, DEPENDURANDO-O POR UM FIO E APROXIMAR DELE OUTRO BASTÃO, IGUALMENTE CARREGADO, ELES **SE REPELEM.**



MAS SE VOCÊ FRICCIONAR UM BASTÃO DE PLÁSTICO COM SEDA...



ELE VAI ATRAIR O BASTÃO DE LÁTEX!



DESTA EXPERIÊNCIA APRENDEMOS QUE HÁ

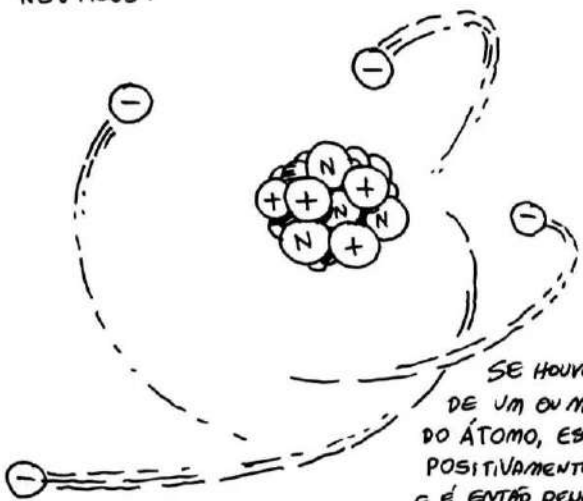
TIPOS DE CARGA...

E QUE CARGAS DO MESMO TIPO SE REPELEM E CARGAS DE TIPOS DIFERENTES SE ATRAEM!!

BENJAMIN FRANKLIN

(1706-1790) CHAMOU OS DOIS TIPOS DE CARGA DE **POSITIVA** E **NEGATIVA**. HOJE NÓS SABEMOS QUE TODA A MATÉRIA É FEITA DE ÁTOMOS, CONSTITUÍDOS DE **ELÉTRONS**, NEGATIVAMENTE CARREGADOS, CIRCULANDO EM TORNO DE UM NÚCLEO ONDE HÁ **PRÓTONS**, POSITIVAMENTE CARREGADOS, E **NÊUTRONS**, QUE NÃO TÊM CARGA.

ELÉTRONS E PRÓTONS TÊM CARGAS DE MESMA INTENSIDADE, MAS OPOSTAS. OS ÁTOMOS TÊM, NORMALMENTE, UM NÚMERO DE ELÉTRONS CERTO PARA CONTRABALANÇAR OS PRÓTONS DO NÚCLEO, DE FORMA QUE OS ÁTOMOS FICAM GLOBALMENTE NEUTROS.



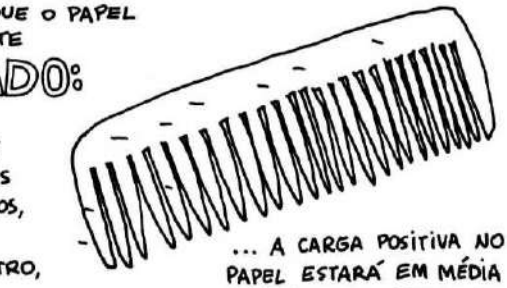
SE HOUVER A REMOÇÃO DE UM OU MAIS ELÉTRONS DO ÁTOMO, ESTE SE TORNA POSITIVAMENTE CARREGADO, E É ENTÃO DENOMINADO **ÍON**.

UM OBJETO CARREGADO TAMBÉM ATRAI OBJETOS NEUTROS. O PENTE DE LÁTEX, CARREGADO NEGATIVAMENTE PELO CABELO DO RINGO, CONSEGUE PUXAR PEDACINHOS DE PAPEL PICADO.

ISSO ACONTECE PORQUE O PAPEL FICA ELETRICAMENTE

POLARIZADO:

O PENTE NEGATIVO REPELE OS ELÉTRONS MAS NÃO OS NÚCLEOS POSITIVOS DOS ÁTOMOS, NO PAPEL. MESMO CONTINUANDO NEUTRO, O PAPEL SOFRE UM DESLOCAMENTO DE CARGA...



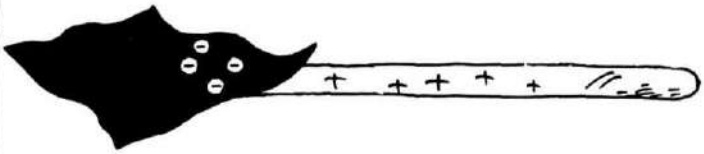
... A CARGA POSITIVA NO PAPEL ESTARÁ EM MÉDIA MAIS PERTO DO PENTE QUE A NEGATIVA; ASSIM A POSITIVA É ATRAÍDA MAIS FORTEMENTE DO QUE A NEGATIVA É REPELIDA!

DESSAS OBSERVAÇÕES, DEDUZIMOS QUE A FORÇA ELÉTRICA

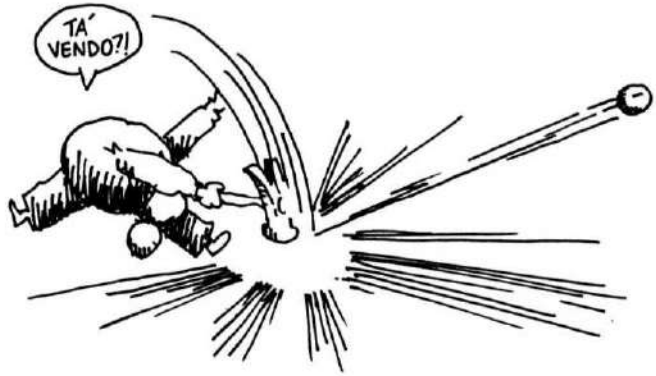
DIMINUI COM A DISTÂNCIA.

AO ESFREGAR O BASTÃO NA PELE, OS PÊLOS CEDEM ELÉTRONS AO BASTÃO QUE FICA NEGATIVAMENTE CARREGADO (DEIXANDO, PORTANTO, A PELE POSITIVA).

DE FORMA SEMELHANTE, A SEDA TIRA ELÉTRONS DO PLÁSTICO, DEIXANDO-O COM CARGA POSITIVA NÃO NEUTRALIZADA.



ELÉTRONS SÃO CARGAS ELEMENTARES, FÁCEIS DE SER TRANSFERIDAS DE UM OBJETO PARA OUTRO, OU DE SEREM CONDUZIDAS - POR UM FIO DE COBRE, POR EXEMPLO.



MATERIAIS COMO BORRACHA, VIDRO E PLÁSTICO SÃO

ISOLANTES

ELÉTRICOS: PODEMOS TIRAR OU DAR CARGA A ESSES MATERIAIS, MAS A CARGA TENDE A **NÃO** SE MOVER AO LONGO DELES.

PELO CONTRÁRIO, EM METAIS COMO COBRE, PRATA E ALUMÍNIO, OS ELÉTRONS PODEM SE MOVER LIVRE E FACILMENTE. METAIS SÃO

CONDUTORES

ELÉTRICOS. O QUE, EM GERAL, CHAMAMOS DE "ELETRICIDADE" É SIMPLESMENTE UM FLUXO DE ELÉTRONS.

MEDIDAS PRECISAS FEITAS POR CHARLES **COULOMB** (1736-1806) MOSTRARAM QUE AS FORÇAS ELÉTRICAS DECRESCEM COM O QUADRADO DA DISTÂNCIA, TANTO QUANTO A GRAVIDADE. A LEI DE COULOMB PARA A ELETROSTÁTICA* SE PARECE MUITO COM A LEI DE NEWTON PARA A GRAVITAÇÃO.

$$F = k\frac{Qq}{r^2}$$

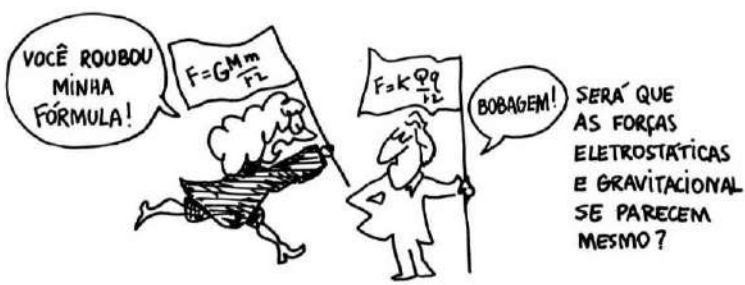
*ELETROSTÁTICA SIGNIFICA QUE AS CARGAS ESTÃO PARADAS.

NA EQUAÇÃO DE COULOMB, Q E q SÃO OS VALORES DAS CARGAS, r É A DISTÂNCIA ENTRE ELAS E K É UMA CONSTANTE (ASSIM COMO G PARA A GRAVIDADE) QUE VALE $K = 9 \times 10^9$.

A UNIDADE DE CARGA É O **COULOMB**.

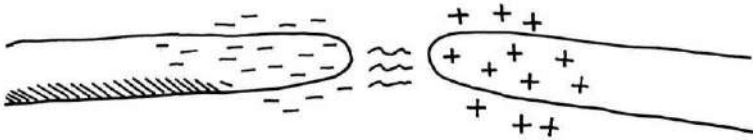
A CARGA DE UM ELÉTRON É

$-e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ COULOMBS



AINDA QUE A LEI DAS FORÇAS ELETROSTÁTICAS PAREÇA SEMELHANTE À DA GRAVIDADE, HÁ GRANDES DIFERENÇAS ENTRE ELAS. POR EXEMPLO, A GRAVIDADE SEMPRE ATRAI, MAS AS FORÇAS ELÉTRICAS, PODEM TANTO ATRAIR QUANTO REPELIR.

ALÉM DISSO, AS FORÇAS ELÉTRICAS SÃO MUITÍSSIMO MAIS INTENSAS QUE A GRAVITACIONAL. SUPONDO QUE CADA BASTÃO TENHA 10^{24} ÁTOMOS (MILHÃO DE MILHÃO DE MILHÃO DE MILHÃO DE ÁTOMOS), SE SÓ UM EM CADA 10^{12} ELÉTRONS (UM DE CADA MILHÃO DE MILHÃO) PASSAR DE UM BASTÃO DE PLÁSTICO PARA UM DE BORRACHA, HAVERÁ UMA FORÇA PERCEPTÍVEL ENTRE ELES.



POR OUTRO LADO, NEM A TOTALIDADE DOS 10^{24} ÁTOMOS DE UM BASTÃO É CAPAZ DE FAZER NOTAR SUA FORÇA GRAVITACIONAL, MESMO POR MÁQUINAS MUITO SENSÍVEIS.

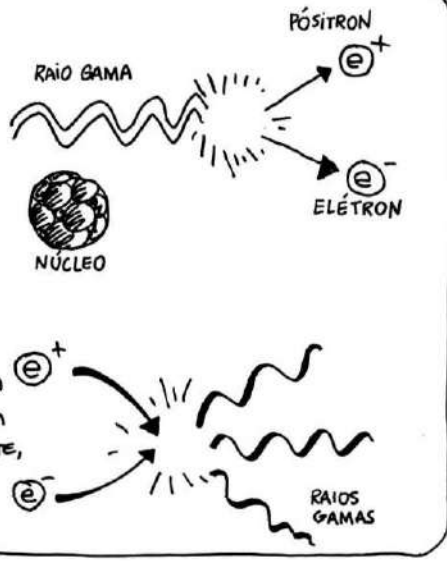
PARA ABRIR MORDA AQUI!

A CARGA SE CONSERVA: A CARGA TOTAL, OU SEJA, A SOMA DA NEGATIVA COM A POSITIVA, NÃO PODE MUDAR EM UM SISTEMA ISOLADO.

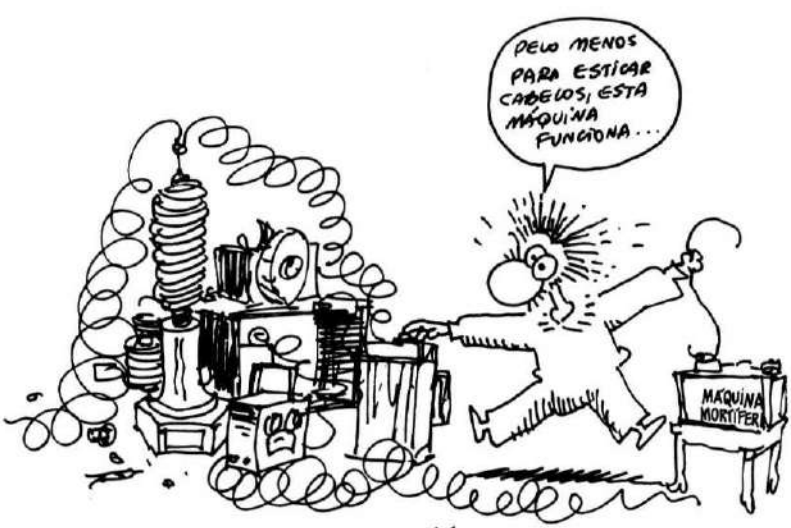
(QUANDO UM BASTÃO NEUTRO ELETRIZOU-SE, PASSANDO NA PELE DE ANIMAL, A CARGA POSITIVA GERADA NA PELE EQUIVALE À NEGATIVA NO BASTÃO.

É POSSÍVEL CRIAR PARES DE CARGAS A PARTIR DE NADA!!!

ISSO PODE ACONTECER QUANDO UM RAIO GAMA, UMA RADIAÇÃO DE ENERGIA MUITO ALTA, PASSA PERTO DE UM NÚCLEO. ELE, O GAMA, PODE DESAPARECER, DANDO LUGAR A UM PAR DE PARTÍCULAS DE CARGAS OPOSTAS; UM ELÉTRON, NEGATIVO, E UM PÓSITRON, QUE É COMO UM ELÉTRON POSITIVO. DA MESMA FORMA, ESSES DOIS PODERIAM SE ANIQUILAR RECIPROCAMENTE, AO SE ENCONTRAREM, DANDO ORIGEM A RAIOS GAMA.

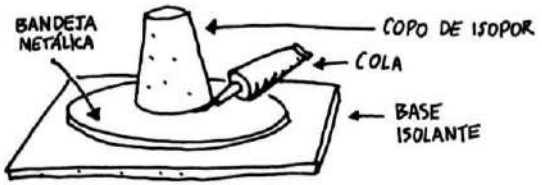


NO ENTANTO, PROCESSO FÍSICO ALGUM PODE CRIAR UMA CARGA **SÓ** !!



HÁ UM APARELHO DE ELETROSTÁTICA QUE A GENTE PODE CONSTRUIR EM CASA MESMO; É O

ELETRÓFORO.

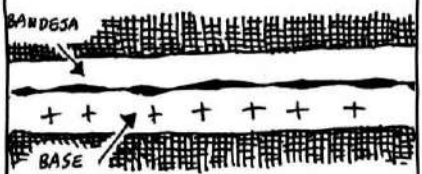


ARRANJE UMA PLACA DE PLÁSTICO, COMO BASE, E UMA BANDEJA DE METAL, POR EXEMPLO, COM UM SEGURADOR ISOLANTE (NO CASO, O COPO DE ISOPOR).

UM ASPECTO INTERESSANTE DESTE EXPERIMENTO É QUE VOCÊ PODE REPETIDAMENTE RECARREGAR A BANDEJA, SIMPLESMENTE TOCANDO-A COM SEU DEDO, SEM VOLTAR A ESFREGAR A BASE.

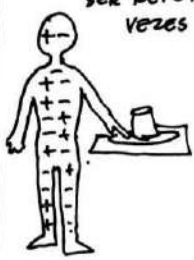
COMO FUNCIONA ISSO? DE ONDE VEM A ENERGIA PARA A FAÍSCA SE NÃO SE ESTÁ "GASTANDO" A CARGA DA BASE?

A BASE É CARREGADA POSITIVAMENTE POR FRICÇÃO. QUANDO A BANDEJA É POSTA SOBRE A BASE, ESTA SÓ É TOCADA EM POUCOS PONTOS DE CONTATO:



COMO A BASE É ISOLANTE, POUCA CARGA FUI. AO TOCAR O METAL COM SEUS DEDOS, ELÉTRONS DE SEU CORPO, ATRAÍDOS PELA BASE POSITIVA, FLUEM PARA A BANDEJA, CARREGANDO-A NEGATIVAMENTE.

SEU CORPO FUNCIONARÁ COMO O "TERRA", OU SEJA, COMO UM RESERVATÓRIO DE CARGAS POSITIVAS E NEGATIVAS. COMO A CARGA DA BANDEJA VEM DE VOCÊ, A EXPERIÊNCIA PODE SER REPETIDA QUANTAS VEZES DESEJAR.



MAS... DE ONDE VEM A ENERGIA PARA A FAÍSCA? VEM DO ESFORÇO DE PUXAR, CADA VEZ, A BANDEJA NEGATIVA AFASTANDO-A DA BASE POSITIVA.

◦CAPÍTULO 13◦
CAMPOS ELÉTRICOS

A TERRA EXERCE UMA FORÇA SOBRE A LUA, UM CORPO A MILHARES DE QUILÔMETROS DE DISTÂNCIA. DE FORMA SEMELHANTE, UMA CARGA ELÉTRICA EXERCE FORÇAS SOBRE OUTRAS CARGAS ESPACIALMENTE SEPARADAS DELA.

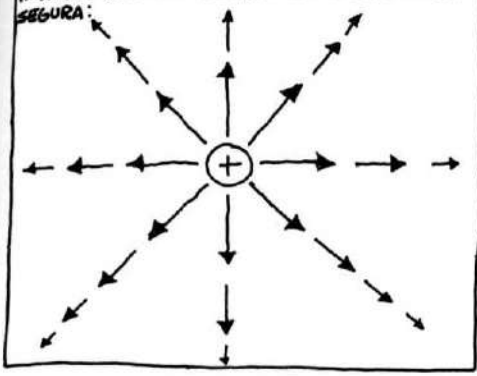
COMO É POSSÍVEL EXERCER FORÇA SOBRE ALGO QUE NÃO SE ESTÁ TOCANDO? COMO A FORÇA CONSEGUE CRUZAR O ESPAÇO? COM QUE VELOCIDADE?

A RESPOSTA É QUE A TERRA PREENCHE TODO O ESPAÇO COM SEU **CAMPO GRAVITACIONAL.** É O CAMPO (SEJA LÁ O QUE FOR ISSO!) QUE CAUSA A FORÇA SOBRE AS MASSAS QUE ESTIVEREM DENTRO DELE.

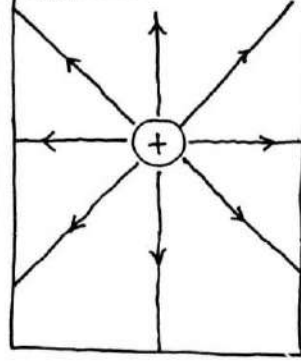
DA MESMA FORMA, UMA CARGA PREENCHE O ESPAÇO COM SEU **CAMPO ELÉTRICO.** QUANDO HOUVER OUTRAS CARGAS NESSE CAMPO ELÉTRICO, FORÇAS ELÉTRICAS AGEM NELAS!

PODEMOS VISUALIZAR O CAMPO ELÉTRICO, IMAGINANDO QUE CARREGAMOS UMA PEQUENA CARGA DE TESTE, POSITIVA, E VAMOS MAPEANDO A DIREÇÃO DA FORÇA SOBRE ELA. NESTE CASO, O RINGO ESTÁ PARADO SEGURANDO A CARGA POSITIVA QUE CRIA O CAMPO, ENQUANTO EU VOU CIRCULANDO COM A CARGA TESTE VERIFICANDO O CAMPO.

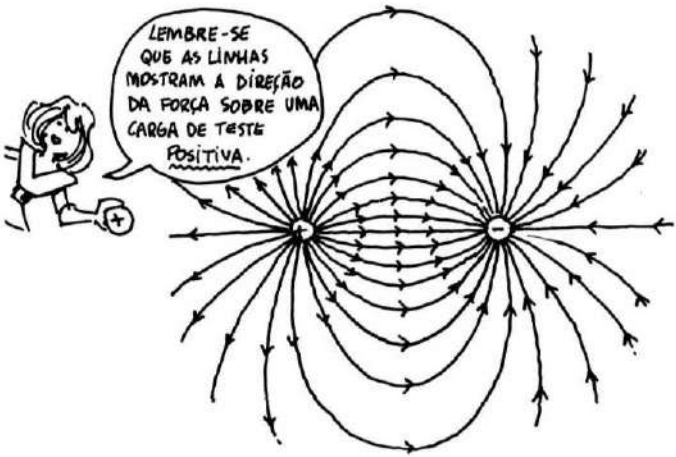
SE DESENHARMOS FLECHAS NA DIREÇÃO DA FORÇA, COM COMPRIMENTO PROPORCIONAL À INTENSIDADE DA FORÇA, CHEGAREMOS A UMA IMAGEM DO CAMPO DEVIDO À CARGA QUE RINGO SEGURA:



SE LIGARMOS AS FLECHAS, COM AS **LINHAS DE CAMPO**, A IMAGEM DO CAMPO FICA:



AS LINHAS DE CAMPO DÃO UMA IDÉIA BEM ILUSTRATIVA DOS CAMPOS ELÉTRICOS. POR EXEMPLO, PARA DUAS CARGAS SE ATRAINDO:



AS LINHAS DE CAMPO SAEM DA CARGA POSITIVA E ENTRAM NA CARGA NEGATIVA, POIS UMA CARGA NEGATIVA ATRAI AS CARGAS DE TESTE... POSITIVAS.

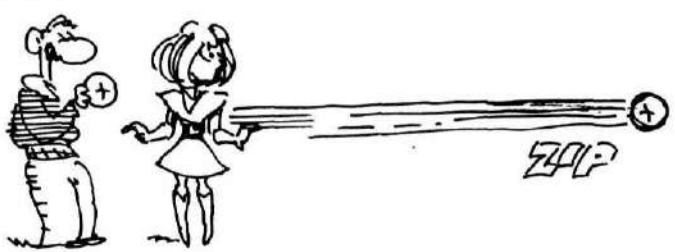
COMO CAMPOS ELÉTRICOS CAUSAM FORÇAS SOBRE CARGAS, HÁ UMA ENERGIA ENVIADA À POSIÇÃO DE CADA CARGA NO CAMPO. O RINGO ESTÁ SEGURANDO UMA CARGA POSITIVA E, PARTINDO DE BEM LONGE, VOU LEVANDO AOS POUCOS A PEQUENA CARGA DE TESTE PARA PERTO DELE.

COMO EU ME APROXIMO E A CARGA ESTÁ SENDO REPELIDA, EU TENHO QUE FAZER FORÇA PARA APROXIMÁ-LA DA QUE CRIA O CAMPO. FORÇA VEZES DISTÂNCIA É IGUAL A TRABALHO — EU REALIZO UM TRABALHO SOBRE A CARGA TESTE.

DIZEMOS QUE O TRABALHO VAI PARA A

ENERGIA POTENCIAL

DA CARGA DE TESTE.
SE LARGARMOS A CARGA DE TESTE, ELA VOA LONGE, POIS SUA ENERGIA POTENCIAL É CONVERTIDA EM ENERGIA CINÉTICA.



SE QUISERMOS ABSTRAIR A CARGA DE TESTE, ATRIBUINDO UM VALOR DA ENERGIA POTENCIAL ESTRITAMENTE AO CAMPO DA CARGA DO RINGO, PODEMOS DIVIDIR A ENERGIA PELO VALOR DA CARGA DE TESTE:

$$\text{Potencial} = \frac{\text{ENERGIA POTENCIAL}}{\text{CARGA}}$$

ESSA EQUAÇÃO DEFINE UMA NOVA QUANTIDADE, O POTENCIAL ELÉTRICO*, MEDIDO EM UNIDADES DE ENERGIA DIVIDIDA POR CARGA, OU SEJA, EM JOULES POR COULOMB, QUE É TÃO IMPORTANTE QUE A GENTE LHE DÁ UM NOME PRÓPRIO, O **VOLT.**

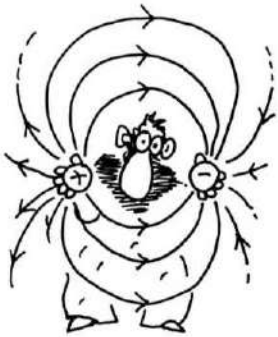
$$1\ \text{Volt} = 1\ \frac{\text{JOULE}}{\text{COULOMB}}$$

COMO ESTAMOS DIANTE DE UMA NOVA DEFINIÇÃO, VAMOS COMPREENDER O CONCEITO BÁSICO: SE UMA BATERIA É DE 6 VOLTS, ISSO SIGNIFICA QUE SE UMA CARGA DE 1 COULOMB CIRCULAR ENTRE SEUS TERMINAIS, A ESSA CARGA TERÁ SIDO TRANSFERIDA UMA ENERGIA DE 6 JOULES.

* HÁ TAMBÉM UM POTENCIAL GRAVITACIONAL. SE A ENERGIA POTENCIAL GRAVITACIONAL É $E_p = mgh$ ENTÃO $\frac{E_p}{m} = gh$ É A CAPACIDADE DO CAMPO GRAVITACIONAL DE ATRIBUIR ENERGIA A QUALQUER MASSA, A UMA ALTURA h.

POIS BEM, AQUI ESTÁ UMA CARGA... MAS CONFESSO QUE AINDA NÃO PERCEBI BEM A IDÉIA...

O QUE É UMA CARGA AFINAL? QUER DIZER... ELA DEVE SER ALGO, NÃO É MESMO...?



E ESSE TAL DE CAMPO ELÉTRICO... QUE DIABO É ISTO ?!

COMO PODE ELE PRODUZIR FORÇAS? COMO ALGO QUE "ENCHE O ESPAÇO" EMPURRA COISAS ??

ESTOU MAIS CONFUSO DO QUE NUNCA!!

HMM...

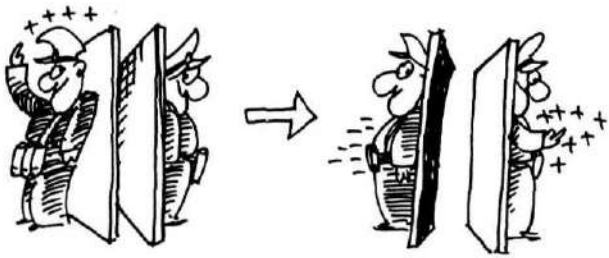
SINTO MUITO, GAROTÃO, VOCÊ ATÉ TEM RAZÃO... O ELETROMAGNETISMO CLÁSSICO NEM TENTA RESPONDER A TAIS QUESTÕES, SÓ DESCREVE COMO AS CARGAS E CAMPOS ATUAM. MAS SE VOCÊ AGÜENTAR ATÉ O FIM DO LIVRO, VAMOS VER ALGO QUE A TEORIA QUÂNTICA DIZ SOBRE O QUE CARGAS E CAMPOS "REALMENTE SÃO..."

◊ CAPÍTULO 14 ◊

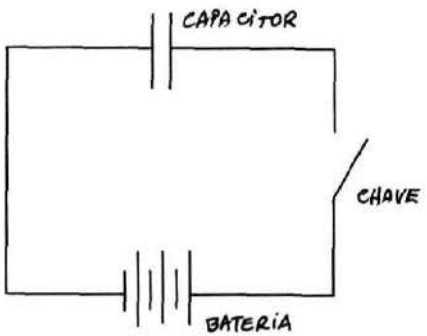
CAPACITORES

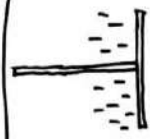
UM CAPACITOR CONSISTE DE DOIS CONDUTORES SEPARADOS POR UM ISOLANTE, POR EXEMPLO, DUAS PLACAS DE METAL COM AR ENTRE ELAS.

UM CAPACITOR É CARREGADO REMOVENDO-SE CARGAS DE UMA PLACA E COLOCANDO-SE NA OUTRA ...

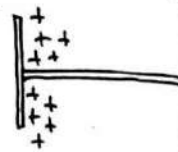


... E A MANEIRA MAIS FÁCIL DE FAZER ISSO É CONECTANDO POR UM TEMPO O CAPACITOR A UMA BATERIA (COM O USO DA CHAVE INTERRUPTORA). A BATERIA BOMBEIA CARGAS DE UMA PLACA PARA OUTRA.





QUANDO FECHAMOS A CHAVE, A ELETRICIDADE FLUI, ACUMULANDO CARGA NO CAPACITOR, A QUANTIDADE DE CARGA SENDO PROPORCIONAL À VOLTAGEM (POTENCIAL) DA BATERIA, DE FORMA QUE:



$$Q = CV$$

CARGA = CONSTANTE x TENSÃO

A CONSTANTE DE PROPORCIONALIDADE **C** É UM NÚMERO QUE DEPENDE DAS CARACTERÍSTICAS DO CAPACITOR. CHAMA-SE

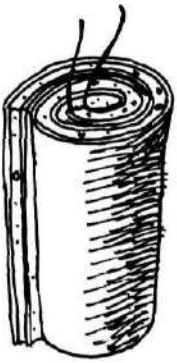
CAPACITÂNCIA.

CAPACITÂNCIA MEDE-SE EM **FARADS**, POR CONTA DE MICHAEL **FARADAY** (1791-1867). QUANTO MAIOR A CAPACITÂNCIA, MAIS CARGA PODE SER ARMAZENADA NUM CAPACITOR, PARA UM DADO POTENCIAL DA BATERIA USADA.

A CAPACITÂNCIA, POR SUA VEZ, É PROPORCIONAL À ÁREA DAS PLACAS E É INVERSAMENTE PROPORCIONAL À DISTÂNCIA ENTRE ELAS. QUANTO MAIORES AS PLACAS E QUANTO MAIS JUNTAS ESTIVEREM, MAIOR A CARGA QUE O CAPACITOR SEGURA.

OS CAPACITORES USADOS EM ELETRÔNICA PODEM SER FEITOS DE DUAS FOLHAS DE ALUMÍNIO

COM UMA SUBSTÂNCIA QUÍMICA ENTRE ELAS, UM LÍQUIDO VISCOSO E ISOLANTE. AS FOLHAS SÃO ENROLADAS...



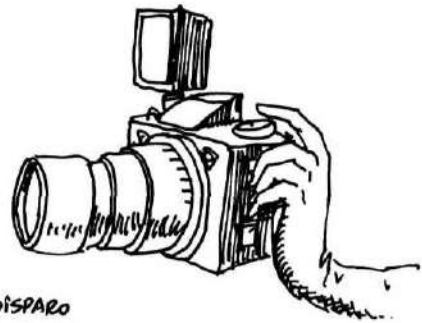
.. DEPOIS PARA GANHAR A FORMA CONVENIENTE DE UM PEQUENO CILINDRO.

DEPOIS DE CARREGADO, MESMO DESCONECTADO DA BATERIA, O CAPACITOR MANTÉM A CARGA, POR MINUTOS OU HORAS, AINDA QUE GRADATIVAMENTE ELA VÁ "VAZANDO".

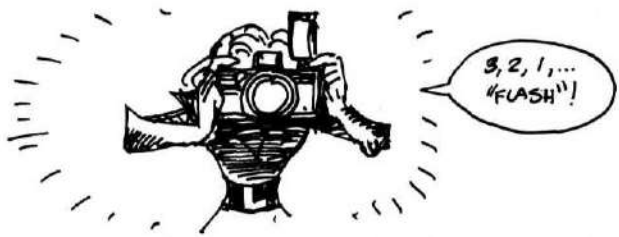
MAS SE A GENTE JUNTAR OS TERMINAIS DO CAPACITOR... OCORRE UMA DESCARGA QUE, QUASE INSTANTANEAMENTE, DESCARREGA O CAPACITOR.

UM EXEMPLO DE USO DE CAPACITOR ESTÁ NO "FLASH" DA MÁQUINA FOTOGRÁFICA!

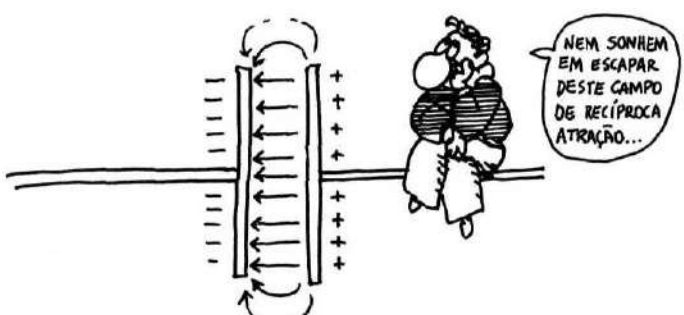
HÁ UM GRANDE CAPACITOR QUE ACUMULA A ENERGIA NECESSÁRIA PARA BRILHAR O "FLASH", À MEDIDA QUE É CARREGADO POR UMA BATERIA, DURANTE UNS 30 SEGUNDOS.



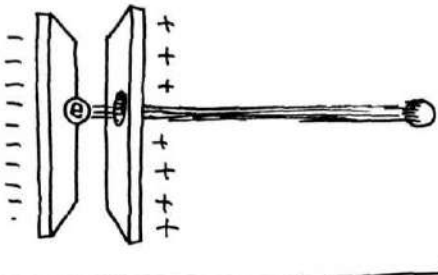
QUANDO O BOTÃO DE DISPARO É APERTADO, FECHA-SE A CHAVE QUE FAZ DESCARREGAR TUDO NUM INSTANTE, ATRAVÉS DO "FLASH".



QUANDO O CAPACITOR É CARREGADO, CARGAS POSITIVAS E NEGATIVAS FICAM FRENTE A FRENTE, SÓ SEPARADAS PELO ESTREITO ISOLANTE, QUE É CRUZADO POR UM CAMPO ELÉTRICO!



O FORTE CAMPO ENTRE AS DUAS PLACAS CARREGADAS PODE SERVIR PARA ACELERAR UM ELÉTRON, COLOCADO NO ESPAÇO INTERNO JUNTO À PLACA NEGATIVA, EM DIREÇÃO À PLACA POSITIVA. SE FOR FEITO UM FURO NESSA PLACA, O ELÉTRON PASSA DIRETO!



QUE TAL INVENTARMOS NOVA UNIDADE DE ENERGIA, O

ELÉTRON VOLT (eV).

1 eV É A ENERGIA QUE O ELÉTRON TERIA ADQUIRIDO SE ACELERADO ENTRE UM PAR DE PLACAS SOB 1 VOLT DE TENSÃO. SE AS PLACAS ESTIVESSEM A 100 V, A ENERGIA SERIA 100 eV ...

PARA CONVERTER eV EM JOULES, USAMOS A DEFINIÇÃO POTENCIAL: ENERGIA / CARGA:

1 eV = CARGA DO ELÉTRON
×
1 VOLT

$= 1{,}6 \times 10^{-19} C \times 1\ J/C$

$= 1{,}6 \times 10^{-19}$ JOULES

(OU SEJA 0,0000000000000000016 !)
(ZERO, VÍRGULA, DEZOITO ZEROS, 16)

TÉCNICAS MODERNAS CONSEGUEM ACELERAR CARGAS A MUITOS MILHÕES DE ELÉTRON-VOLTS (MeV) COM VELOCIDADE PRÓXIMA À DA LUZ; NESSAS CONDIÇÕES, A TEORIA DA RELATIVIDADE DE EINSTEIN TERIA DE SER USADA.

◊CAPÍTULO 15◊
CORRENTES ELÉTRICAS

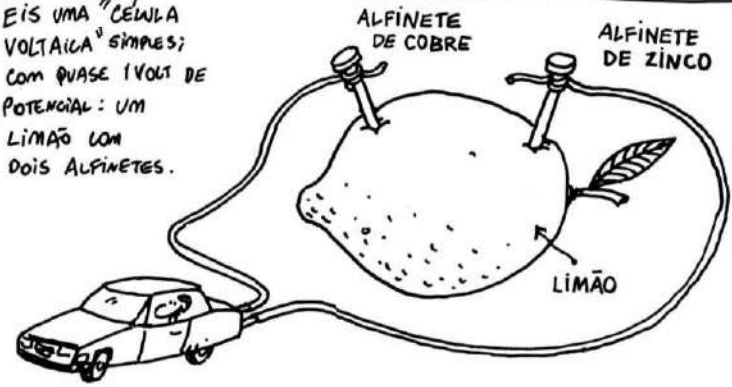
O GRANDE FEITO DO FÍSICO ITALIANO ALESSANRO **VOLTA** FOI A INVENÇÃO DA BATERIA ELÉTRICA EM 1754.

VOLTA DESCOBRIU QUE SE A GENTE MERGULHAR DOIS DIFERENTES METAIS NUM BANHO QUÍMICO, SURGE UMA DIFERENÇA DE POTENCIAL* ENTRE ELES.

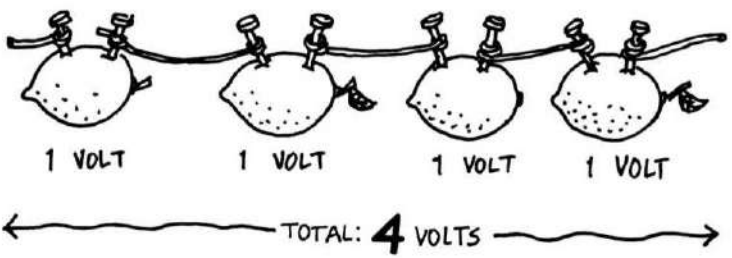
TAL POTENCIAL SIGNIFICA QUE AS CARGAS "GOSTARIAM" DE MOVER-SE DE UM METAL PARA O OUTRO. SE A GENTE LIGAR UM FIO CONDUTOR A AMBOS, AS CARGAS FLUEM POR ELE.

*N. do T.: DIFERENÇA DE POTENCIAL, VOLTAGEM, OU TENSÃO ELÉTRICA SÃO "SINÔNIMOS".

EIS UMA "CÉLULA VOLTAICA" SIMPLES; COM QUASE 1 VOLT DE POTENCIAL: UM LIMÃO COM DOIS ALFINETES.



VOLTA TAMBÉM DESCOBRIU QUE CONECTANDO CÉLULAS EM SÉRIE, OS POTENCIAIS SE SOMAM, ATINGINDO ALTAS VOLTAGENS:



NA REALIDADE, UMA "PILHA" OU "BATERIA" DE LANTERNA É UMA CÉLULA VOLTAICA SIMPLES. A BATERIA DO AUTOMÓVEL, ESSA SIM, É VERDADEIRAMENTE UMA BATERIA, POIS É A ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DE VÁRIAS CÉLULAS.

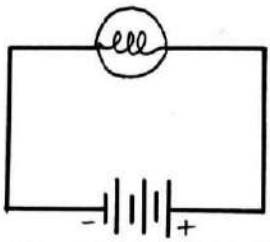
CÉLULA SIMPLES

BATERIA OU "PILHA"

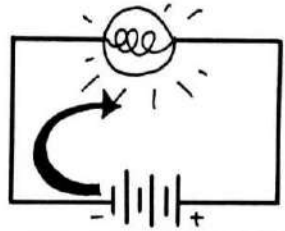
OU SEJA, "BATERIA DE CÉLULAS"

QUE QUER DIZER "CÉLULAS EMPILHADAS"

VEJAMOS UM CIRCUITO ELEMENTAR: UMA BATERIA LIGADA A UMA LÂMPADA DE FILAMENTO.



A BATERIA CONTINUAMENTE "BOMBEIA" CARGAS AO LONGO DO CIRCUITO, FAZENDO INCANDESCER O FILAMENTO.



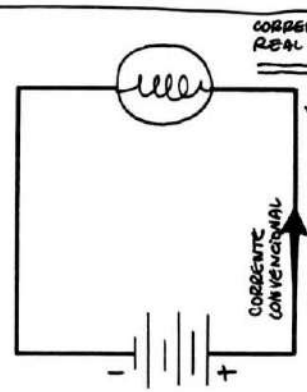
CHAMA-SE ESSE FLUXO DE CARGA DE

CORRENTE.

CORRENTE SE MEDE EM COULOMB POR SEGUNDO, TAMBÉM CONHECIDO COMO:

ampère.

FREQÜENTEMENTE DESENHAMOS UMA FLECHA AO LONGO DO CIRCUITO, VINDO DO TERMINAL POSITIVO DA BATERIA EM DIREÇÃO AO NEGATIVO, COMO SE CARGAS POSITIVAS ESTIVESSEM FLUINDO DESSA FORMA.
ESSA É A "CORRENTE CONVENCIONAL".
A CORRENTE REAL É DOS ELÉTRONS NEGATIVOS, NA DIREÇÃO OPOSTA.
PARA QUASE TODOS OS EFEITOS PRÁTICOS, NÃO FAZ DIFERENÇA LIDAR COM UMA OU OUTRA.



PARA FIXAR TANTOS CONCEITOS, QUE TAL UMA ANALOGIA MECÂNICA?

IMAGINE A CORRENTE ELÉTRICA COMO SE FOSSE ÁGUA FUGINDO POR UMA TUBULAÇÃO. ENTÃO TERÍAMOS AS SEGUINTES CORRESPONDÊNCIAS:

ELETRICIDADE	ÁGUA
1 COULOMB DE CARGA	1 LITRO D'ÁGUA
1 AMPÈRE	1 LITRO/SEGUNDO FLUXO
BATERIA	BOMBA
VOLTAGEM	PRESSÃO DA BOMBA
FIO	TUBULAÇÃO

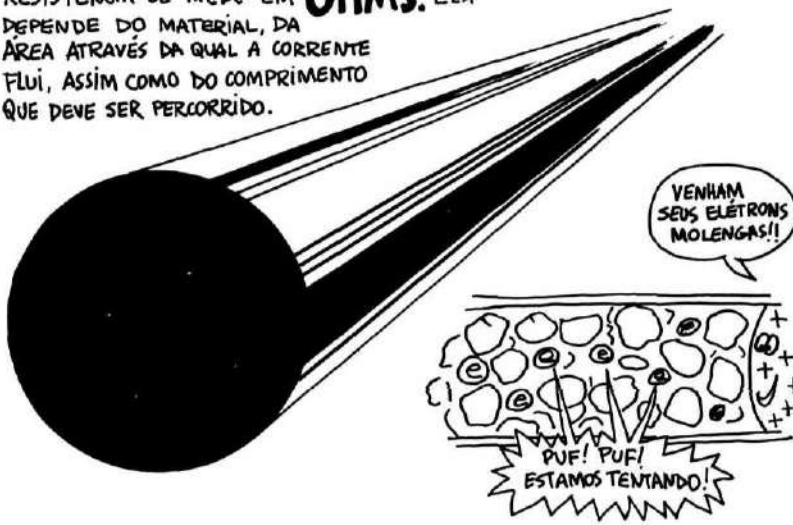
O FILAMENTO DA LÂMPADA É COMO UM TRECHO DA TUBULAÇÃO CHEIO DE CASCALHO, QUE **RESISTE** À PASSAGEM DA ÁGUA E ATÉ SE AQUECE PELO ATRITO COM A ÁGUA.

ASSIM COMO HÁ MAIS FLUXO COM MAIS PRESSÃO, PARA OBTER UMA CORRENTE GRANDE É PRECISO VOLTAGEM GRANDE-GEORGE **OHM** (1789-1854) RESUMIU ESSA RELAÇÃO NA **LEI DE OHM:**

A CORRENTE **i** É IGUAL A VOLTAGEM **V** DIVIDIDA PELA RESISTÊNCIA **R**. QUANTO MAIOR A VOLTAGEM, MAIS CORRENTE FLUI POR UMA DADA RESISTÊNCIA.

(A LEI DE OHM NÃO VALE PARA TODOS OS MATERIAIS E CIRCUNSTÂNCIAS, MAS É APLICÁVEL O SUFICIENTE PARA SER RECONHECIDAMENTE ÚTIL.)

RESISTÊNCIA SE MEDE EM **OHMS**. ELA DEPENDE DO MATERIAL, DA ÁREA ATRAVÉS DA QUAL A CORRENTE FLUI, ASSIM COMO DO COMPRIMENTO QUE DEVE SER PERCORRIDO.



LEMBRE-SE DA ANALOGIA COM UMA TUBULAÇÃO CHEIA DE CASCALHO. UM TRECHO COM O DOBRO DO COMPRIMENTO OFERECE O DOBRO DA RESISTÊNCIA... UM TUBO MAIS LARGO FAZ MENOS RESISTÊNCIA POIS DÁ MAIS ESPAÇO PARA A ÁGUA FLUIR... E A RESISTÊNCIA DEPENDE DO TIPO DE CASCALHO.

TUBO LONGO, MAIS RESISTÊNCIA
TUBO CURTO, MENOS RESISTÊNCIA
MAIS ESTREITO, MAIS RESISTÊNCIA
TUBO MAIS LARGO, MENOS RESISTÊNCIA
CASCALHO POLIDO, MENOS RESISTÊNCIA
CASCALHO BRUTO, MAIS RESISTÊNCIA

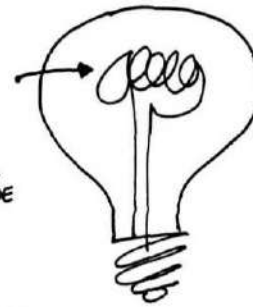
DA MESMA FORMA, A RESISTÊNCIA DE UM FIO ELÉTRICO É PROPORCIONAL A SEU COMPRIMENTO E INVERSAMENTE PROPORCIONAL À ÁREA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DO FIO.

ASSIM COMO HÁ DIFERENTES CASCALHOS NA ÁGUA, DIFERENTES MATERIAIS TÊM **RESISTIVIDADE** INTRÍNSECA DIFERENTE. BON CONDUTORES TÊM BAIXA RESISTIVIDADE.

BONS CONDUTORES COM BAIXA RESISTIVIDADE:
PRATA,
OURO,
COBRE,
ALUMÍNIO

MAUS CONDUTORES COM ALTA RESISTIVIDADE:
PLÁSTICO,
PAPEL,
PANO

UM FILAMENTO DE LÂMPADA É FEITO DE **TUNGSTÊNIO**, QUE TEM RESISTIVIDADE MUITO MAIOR QUE A DO COBRE – PORTANTO, O FILAMENTO TEM RESISTÊNCIA MAIOR QUE UM FIO DE COBRE DE MESMAS DIMENSÕES.



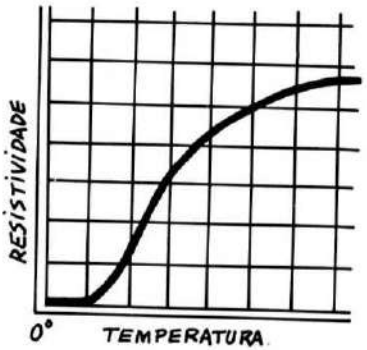
(É DESEJÁVEL TER-SE ALTA RESISTÊNCIA NUMA LÂMPADA, DE FORMA QUE ELA "DISSIPE" EM LUZ A ENERGIA ELÉTRICA!)

A RESISTIVIDADE TAMBÉM VARIA COM A TEMPERATURA. PARA A MAIORIA DOS MATERIAIS, ELA CRESCE COM A TEMPERATURA, POIS A VIBRAÇÃO DOS ÁTOMOS E MOLÉCULAS INTERFERE COM O FLUXO DAS CARGAS.

PARA VÁRIOS MATERIAIS, COMO MERCÚRIO E ALUMÍNIO, A RESISTIVIDADE CAI A

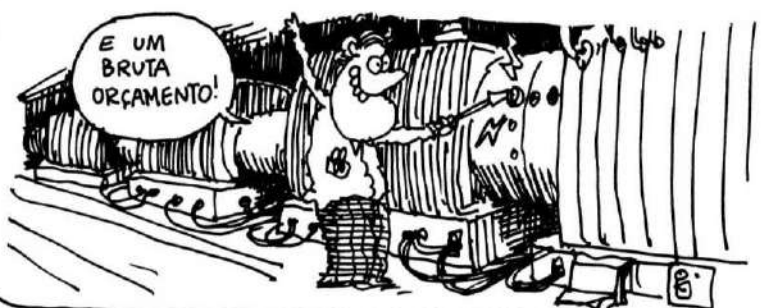
ZERO

A TEMPERATURAS MUITO BAIXAS, PRÓXIMAS DO "ZERO ABSOLUTO" (−273°C). TAIS MATERIAIS NÃO TÊM NENHUMA RESISTÊNCIA, E POR ISSO SÃO DENOMINADOS



SUPERCONDUTORES.

UMA COISA INCRÍVEL DOS SUPERCONDUTORES É QUE ELES RETÊM A CORRENTE (POR ANOS ATÉ) E NÃO PRODUZEM CALOR. ELES SÃO CAROS PARA MANTER MAS NECESSÁRIOS, POR EXEMPLO, EM GRANDES ACELERADORES DE PARTÍCULAS, ONDE OS ENORMES ELETROÍMÃS EXIGEM CORRENTES ENORMES...



EM 1986, CIENTISTAS DESCOBRIRAM VÁRIOS NOVOS MATERIAIS SUPERCONDUTORES QUE PERDIAM SUA RESISTIVIDADE A TEMPERATURAS BEM MAIS ALTAS, À CERCA DE −180°C. ISSO PODE PARECER BEM FRIO, MAS É ATÉ QUENTE, COMPARADO COM OS −273°C DO ZERO ABSOLUTO.

TAIS COMPOSTOS PODEM SER RESFRIADOS COM NITROGÊNIO LÍQUIDO, RELATIVAMENTE BARATO. PODEMOS, COM BASE NELES, PENSAR EM APLICAÇÕES NOTÁVEIS COMO TRENS LEVITANDO...

VOLTEMOS A NOSSO EXEMPLO SIMPLES DE UMA LAMPADINHA DE FILAMENTO LIGADA A UMA BATERIA DE SEIS VOLTS.

SE, POR ACASO, O FILAMENTO DA LÂMPADA TIVER 6 OHMS DE RESISTÊNCIA, A CORRENTE SERIA, PELA LEI DE OHM:

$$i = V/R = \frac{6 \text{ VOLTS}}{6 \text{ OHMS}} = 1 \text{ AMPÈRE}$$

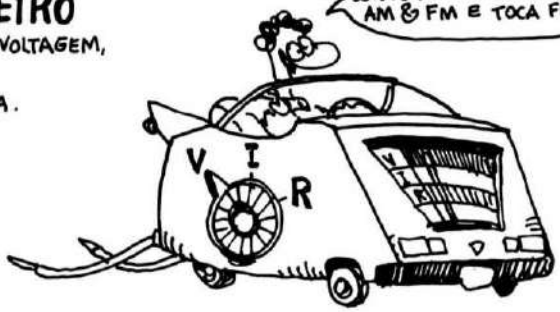
AHÁ! VOCÊ SE ESQUECEU DA RESISTÊNCIA DO FIO DE LIGAÇÃO.
SE O FIO NÃO FOR MUITO FINO OU MUITO COMPRIDO, SUA RESISTÊNCIA É DESPREZÍVEL (EM COMPARAÇÃO COM O FILAMENTO DE TUNGSTÊNIO) CONTRIBUINDO POUQUÍSSIMO PARA A RESISTÊNCIA TOTAL.

A QUESTÃO É COMO MEDIR ESSAS QUANTIDADES NOS CIRCUITOS...

HOJE É RELATIVAMENTE BARATO UM

MULTÍMETRO

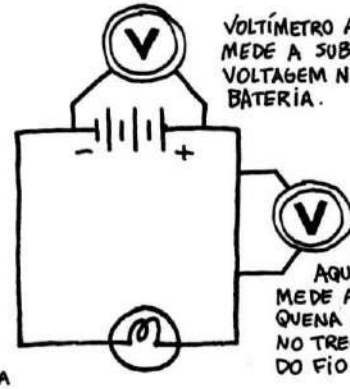
QUE MEDE VOLTAGEM, CORRENTE E RESISTÊNCIA.



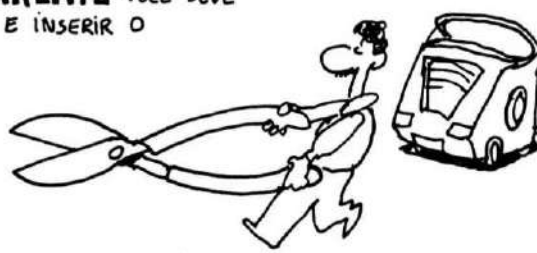
PARA MEDIR VOLTAGEM, TOQUE OS TERMINAIS DO MULTÍMETRO DE CADA LADO DA LÂMPADA, P. EX., E VERIFICARÁ A **QUEDA DE VOLTAGEM** NA LÂMPADA.

A "QUEDA" DE VOLTAGEM (OU QUEDA DE TENSÃO, OU DIFERENÇA DE POTENCIAL) TEM A VER COM A ENERGIA, POR UNIDADE DE CARGA, QUE VIRA CALOR E LUZ.

SE VOCÊ TIVESSE TOCADO COM AMBOS OS TERMINAIS DO MESMO LADO DA LÂMPADA, A LEITURA DO MULTÍMETRO SERIA QUASE ZERO, POIS POUCA ENERGIA É CONSUMIDA PARA A CORRENTE PASSAR POR UM CURTO TRECHO DE FIO DE COBRE. MAS SE VOCÊ TOCAR DE AMBOS OS LADOS DA BATERIA, AÍ VOCÊ ESTARÁ MEDINDO A "SUBIDA" DE TENSÃO OU DE VOLTAGEM, OU SEJA, A ENERGIA POR UNIDADE DE CARGA BOMBEADA NO CIRCUITO PELA BATERIA.



PARA MEDIR **CORRENTE** VOCÊ DEVE ABRIR O CIRCUITO E INSERIR O AMPERÍMETRO.

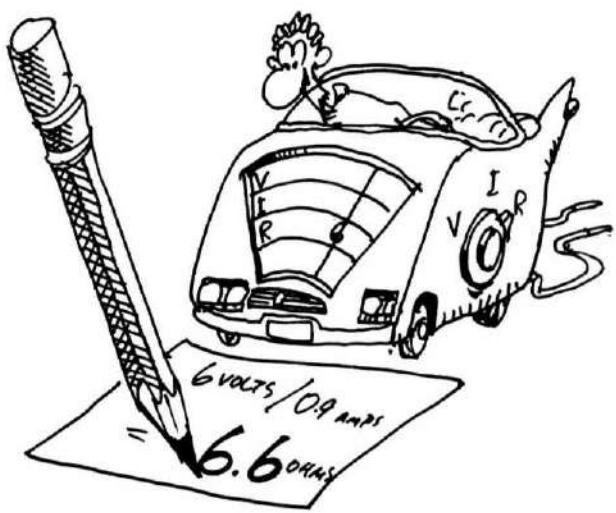


NESTE CIRCUITO SIMPLES É A MESMA CORRENTE QUE CIRCULA EM TODAS AS PARTES. TEMOS DE FAZÊ-LA PASSAR TAMBÉM PELO AMPERÍMETRO.

VOCÊ PODE MEDIR DIRETAMENTE A RESISTÊNCIA DO FILAMENTO DA LÂMPADA, TIRANDO-A DO CIRCUITO E TESTANDO-A COM A LIGAÇÃO COM O OHMÍMETRO DO MULTÍMETRO.

OU AINDA VOCÊ PODE USAR OS VALORES OBTIDOS PARA AS MEDIDAS JÁ FEITAS DE VOLTAGEM E DE CORRENTE E CALCULAR A RESISTÊNCIA COM A LEI DE OHM.

ESSAS DUAS FORMAS DE MEDIR A RESISTÊNCIA DÃO VALORES DIFERENTES, E ISSO É CORRETO PELA SEGUINTE RAZÃO: FORA DO CIRCUITO, O FILAMENTO ESTÁ BEM MAIS FRIO QUE QUANDO ACESO. COMO JÁ FOI DITO, QUANTO MAIS QUENTE, MAIOR A RESISTÊNCIA.



OUTRA UNIDADE MUITO FAMILIAR EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS É O **WATT**, A UNIDADE DA **POTÊNCIA**.

POTÊNCIA É DEFINIDA COMO **ENERGIA** POR UNIDADE DE TEMPO. ELA MEDE QUÃO RAPIDAMENTE SE CONSOME OU PRODUZ ENERGIA. É CLARO QUE TAMBÉM SE APLICA A SISTEMAS MECÂNICOS. UM CARRO POTENTE ACELERA RAPIDAMENTE E UMA LÂMPADA POTENTE EMITE MUITA LUZ POR SEGUNDO.

POR DEFINIÇÃO, UM **WATT** É UM **JOULE POR SEGUNDO** - DE FORMA QUE PODEMOS RELACIONAR WATTS A VOLTS E AMPÈRES.

$$\text{POTÊNCIA} \Rightarrow \text{WATT} = \frac{\text{JOULES}}{\text{SEGUNDO}} =$$

$$\frac{\text{JOULE}}{\text{COULOMB}} \times \frac{\text{COULOMB}}{\text{SEGUNDO}} =$$

VOLTS x AMPÈRE

O PRODUTO DA **VOLTAGEM** PELA **CORRENTE** É A **POTÊNCIA**

$$P = Vi$$

WATT = VOLT X AMPÉRE

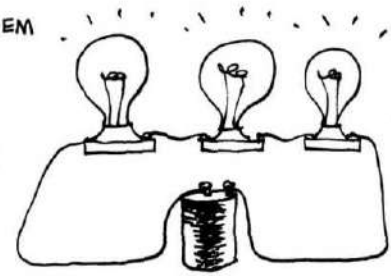
NO CASO DA LAMPADINHA DE 6-OHM LIGADA À BATERIA DE 6 VOLTS, TEMOS 1 AMPÉRE DE CORRENTE E A POTÊNCIA É

P = 6 VOLTS X 1 AMPÉRE

= 6 WATTS.

CAPÍTULO 16
SÉRIE E PARALELO

VAMOS INSTALAR AGORA TRÊS LÂMPADAS IGUAIS EM **SÉRIE** COM UMA BATERIA. ISSO SIGNIFICA QUE ELAS ESTÃO LIGADAS EM SEQUÊNCIA: A CORRENTE QUE ATRAVESSA UMA TAMBÉM PASSA PELAS OUTRAS.



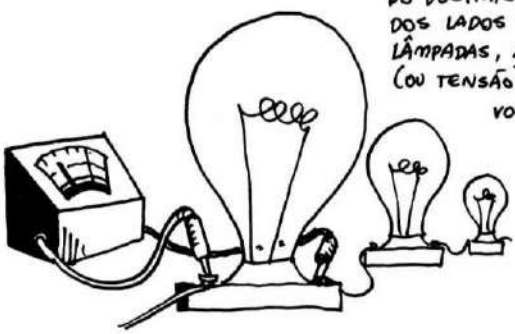
PELA NOSSA ANALOGIA MECÂNICA, CADA FILAMENTO DA LÂMPADA É COMO UM TUBO CHEIO DE CASCALHO. NESSE CASO, A CORRENTE TEM TRÊS VEZES MAIS CASCALHO PARA ATRAVESSAR.
TRÊS VEZES A RESISTÊNCIA!*

*N. do T.: NA REALIDADE, SE FOREM INSERIDAS MAIS DUAS LÂMPADAS EM SÉRIE NUM CIRCUITO ONDE JÁ HAVIA UMA, LIMITA-SE TANTO A CORRENTE QUE A TEMPERATURA DO FILAMENTO DIMINUI E AÍ NÃO VALE AFIRMAR QUE A RESISTÊNCIA É "TRÊS VEZES" A INICIAL, POIS AS RESISTÊNCIAS DIMINUEM JUNTO COM A TEMPERATURA.

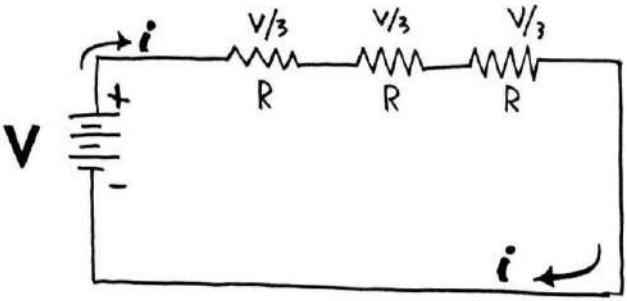
$$i = \frac{V}{R}$$

TRIPLICAR A RESISTÊNCIA SIGNIFICA QUE SÓ UM TERÇO DA CORRENTE FLUIRÁ. A CORRENTE DEVE SER A MESMA EM CADA LÂMPADA, É CLARO, POIS SÓ HÁ UM CAMINHO PARA A CORRENTE SEGUIR E ELA NÃO SE ACUMULA NO CIRCUITO...

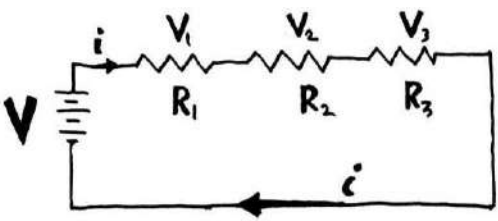
SE A GENTE TOCAR OS EXTREMOS DO VOLTÍMETRO EM CADA UM DOS LADOS DE UMA DAS LÂMPADAS, A QUEDA DA VOLTAGEM (OU TENSÃO) É UM TERÇO DA VOLTAGEM DA BATERIA.



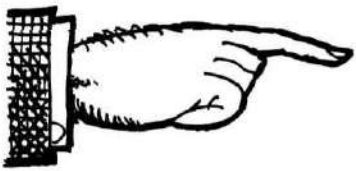
A SOMA DAS QUEDAS DE TENSÃO ELÉTRICA (OU VOLTAGEM) DEVE SER IGUAL À TENSÃO DA BATERIA.



NUM CASO MAIS GERAL, COM LÂMPADAS DIFERENTES, AS QUEDAS DE VOLTAGEM V_1, V_2 E V_3 REPRESENTAM A ENERGIA ELÉTRICA* CONVERTIDA EM LUZ E CALOR EM CADA LÂMPADA.



A ENERGIA TOTAL CONSUMIDA PELAS LÂMPADAS DEVE SER IGUAL À ENERGIA PRODUZIDA PELA BATERIA, DE FORMA QUE A SOMA DAS QUEDAS DE VOLTAGEM DEVE SER IGUAL À TENSÃO DA BATERIA, O QUE SE CHAMA DE PRIMEIRA LEI DE KIRCHHOFF.



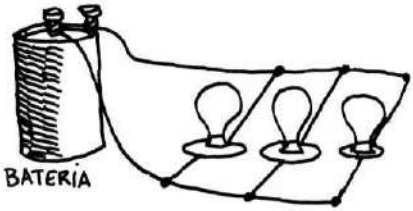
$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

(E $V_1 = iR_1$, ETC.)

EM LIGAÇÃO SÉRIE, CADA UMA DAS LÂMPADAS IGUAIS FICA COM UM TERÇO DA CORRENTE ORIGINAL E COM UM TERÇO DA VOLTAGEM; ASSIM O "BRILHO" OU A POTÊNCIA ($P = Vi$) DE CADA UMA É UM NONO DO QUE SERIA SE SÓ ELA ESTIVESSE NO CIRCUITO.

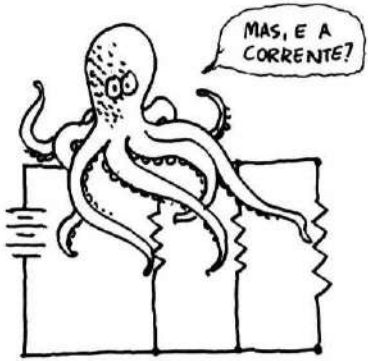
* JÁ VIMOS QUE VOLTAGEM (OU TENSÃO, OU POTENCIAL) É ENERGIA POR UNIDADE DE CARGA, PELA PRÓPRIA DEFINIÇÃO DE POTENCIAL ELÉTRICO, LEMBRA-SE?

VAMOS AGORA LIGAR AS LÂMPADAS EM **PARALELO:**



CADA LÂMPADA É LIGADA DIRETAMENTE À BATERIA, INDEPENDENTEMENTE DAS DEMAIS LÂMPADAS.

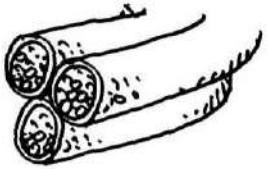
DESSA FORMA, CADA LÂMPADA RECEBE A TENSÃO OU VOLTAGEM TOTAL DA BATERIA E BRILHA COM SEU BRILHO NORMAL. É ASSIM NA INSTALAÇÃO ELÉTRICA DE UMA CASA, ONDE CADA LÂMPADA, TOMADA OU APARELHO RECEBE A VOLTAGEM COMPLETA.



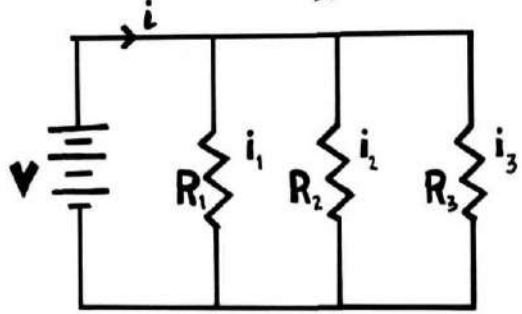
NO CIRCUITO PARALELO, A **CORRENTE** NA BATERIA É A SOMA DAS CORRENTES DE CADA RAMO.

VEJA QUE A **RESISTÊNCIA** TOTAL É UM TERÇO DA DE CADA LÂMPADA - POIS HÁ TRÊS VEZES MAIS "ÁREA NO TUBO DE CASCALHO" PARA O FLUXO PASSAR. FICA TRÊS VEZES MAIS FÁCIL!

POR ISSO, PELA LEI DE OHM, PASSA TRÊS VEZES MAIS CORRENTE PELO CIRCUITO DA BATERIA.



RESUMINDO, NA LIGAÇÃO PARALELO CADA COMPONENTE ESTÁ SUBMETIDO À MESMA TENSÃO (VOLTAGEM) E RECEBE UMA CORRENTE i INVERSAMENTE PROPORCIONAL À SUA RESISTÊNCIA R; ASSIM, PELA LEI DE OHM: $i = V/R$.



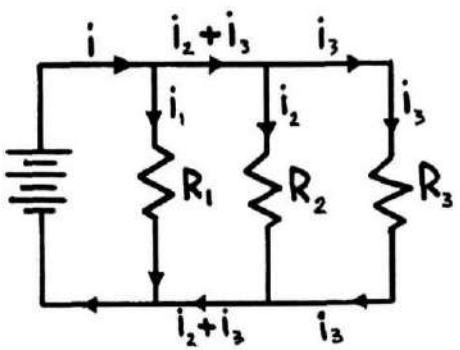
$$i_1 = \frac{V}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{V}{R_2}$$

$$i_3 = \frac{V}{R_3}$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

QUAL É A CORRENTE, EM DIFERENTES PARTES DO CIRCUITO? A CORRENTE QUE CHEGA A CADA JUNÇÃO DEVE SER IGUAL À QUE SAI. CORRENTE, AFINAL, É FLUXO DE CARGA, QUE SE CONSERVA!



ESTA É A CHAMADA

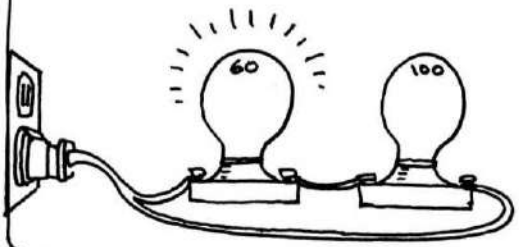
SEGUNDA LEI DE KIRCHHOFF:

"A SOMA DAS CORRENTES CHEGANDO A UM PONTO DE JUNÇÃO É IGUAL À SOMA DAS CORRENTES SAINDO DA JUNÇÃO".

EIS UM INTERESSANTE

PARADOXO:

VAMOS LIGAR EM SÉRIE UMA LÂMPADA DE 60 WATTS E OUTRA DE 100 WATTS.

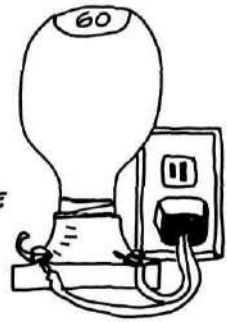


É BOM LEMBRAR QUE A POTÊNCIA NOMINAL, O NÚMERO DE WATTS QUE CONSTA NA LÂMPADA, SÓ VALE SE ELA ESTIVER LIGADA SOZINHA, NÃO EM SÉRIE!

A MESMA CORRENTE **i** PASSA EM AMBAS AS LÂMPADAS, DE FORMA QUE, DA LEI DE OHM,

V = iR DÁ A VOLTAGEM PARA CADA UMA.

A LÂMPADA DE 60 W TEM MAIOR RESISTÊNCIA: QUANDO LIGADA SOZINHA, DEIXA PASSAR MENOS CORRENTE E BRILHA MENOS.



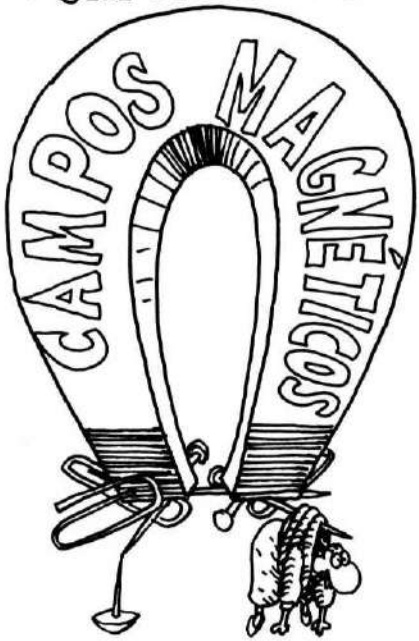
A DE 100 W, COM MENOS RESISTÊNCIA, PERMITE MAIOR CORRENTE E BRILHA MAIS, SE LIGADA SOZINHA.

MAS NA LIGAÇÃO **SÉRIE** A QUE TEM MAIOR RESISTÊNCIA TERÁ A MAIOR QUEDA DE VOLTAGEM COM A **MESMA CORRENTE** QUE A OUTRA...

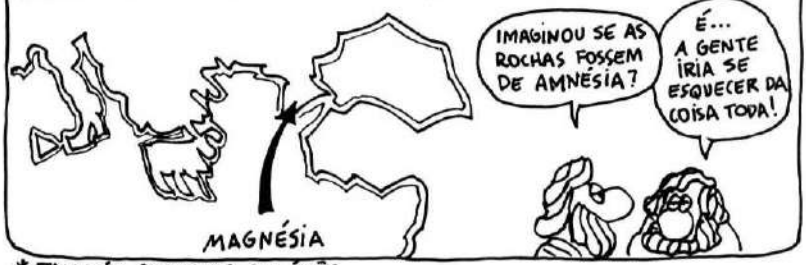
...QUE TEM MENOS RESISTÊNCIA, E PORTANTO MENOR VOLTAGEM!

POR ESSA RAZÃO, A POTÊNCIA $P = Vi$ DA LÂMPADA DE MENOR POTÊNCIA NOMINAL É **MAIOR** QUE A DE MAIOR POTÊNCIA NOMINAL, SE SE ELAS ESTIVEREM EM **SÉRIE**!

◊ CAPÍTULO 17 ◊

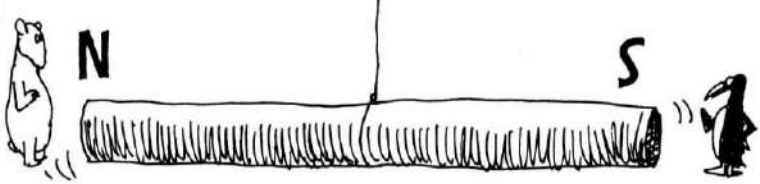


HÁ MILHARES DE ANOS, OS GREGOS DESCOBRIRAM QUE CERTAS ROCHAS METÁLICAS DA REGIÃO DE **MAGNÉSIA**, NA ÁSIA MENOR, ERAM CAPAZES DE ATRAIR FERRO, ASSIM COMO DE ATRAIR OU REPELIR ROCHAS SEMELHANTES. CHAMARAM-SE ENTÃO MAGNETOS* A ESSAS ROCHAS.



* TAMBÉM CHAMADAS DE ÍMÃS.

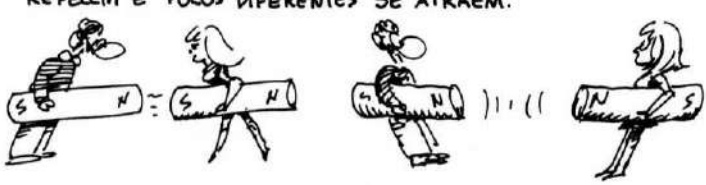
BEM DEPOIS, PERCEBEU-SE QUE TODO MAGNETO SEMPRE TEM DOIS **PÓLOS,** QUE SÃO CHAMADOS DE **NORTE** A **SUL**...



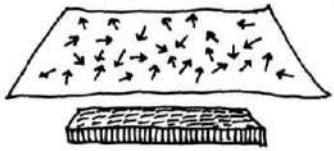
PORQUE SE VOCÊ SUSPENDE UMA BARRA DE MAGNETO POR UM FIO QUE A EQUILIBRE, O PÓLO CHAMADO **NORTE** É O QUE APONTA PARA O NORTE GEOGRÁFICO DA TERRA.

UMA **BÚSSOLA** É SIMPLESMENTE UMA AGULHA MAGNÉTICA EQUILIBRADA NUM PONTO DE PIVÔ.

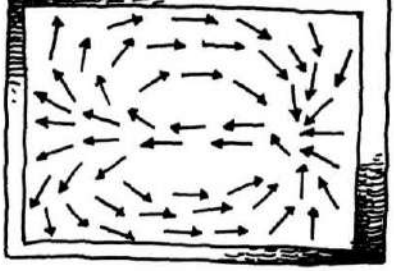
A GENTE PODE VERIFICAR TAMBÉM QUE PÓLOS IGUAIS SE REPELEM E PÓLOS DIFERENTES SE ATRAEM.



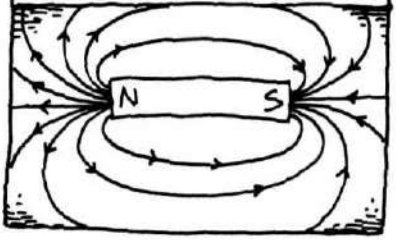
SE A GENTE ESPALHAR AGULHINHAS MAGNÉTICAS NUMA FOLHA DE PAPEL E COLOCAR UMA BARRA MAGNÉTICA DEBAIXO:



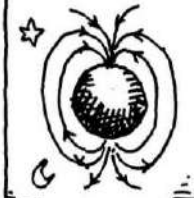
AS AGULHAS SE ALINHAM REVELANDO O **CAMPO MAGNÉTICO** DEVIDO À BARRA MAGNÉTICA.



COMO NO CAMPO ELÉTRICO, DESENHAMOS LINHAS NA DIREÇÃO DAS FLECHAS E VEREMOS COMO RESULTADO **LINHAS DE CAMPO**.

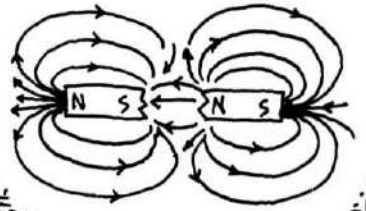


POR CONVENÇÃO, DIZEMOS QUE AS LINHAS DE CAMPO EMERGEM DO PÓLO MAGNÉTICO **NORTE** E APONTAM NA DIREÇÃO DO PÓLO MAGNÉTICO **SUL**.

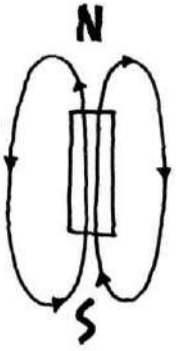


(É CLARO QUE, ASSIM, O PÓLO GEOGRÁFICO NORTE É O PÓLO MAGNÉTICO SUL, E VICE-VERSA!)

SE A GENTE QUEBRAR UM MAGNETO (OU ÍMÃ), SURGEM DOIS NOVOS PÓLOS DE FORMA QUE É IMPOSSÍVEL ISOLAR UM PÓLO SÓ.



TAMBÉM AS LINHAS DE CAMPO NÃO TERMINAM NOS PÓLOS, MAS ATRAVESSAM OS ÍMÃS DO SUL AO NORTE, FORMANDO CURVAS FECHADAS.

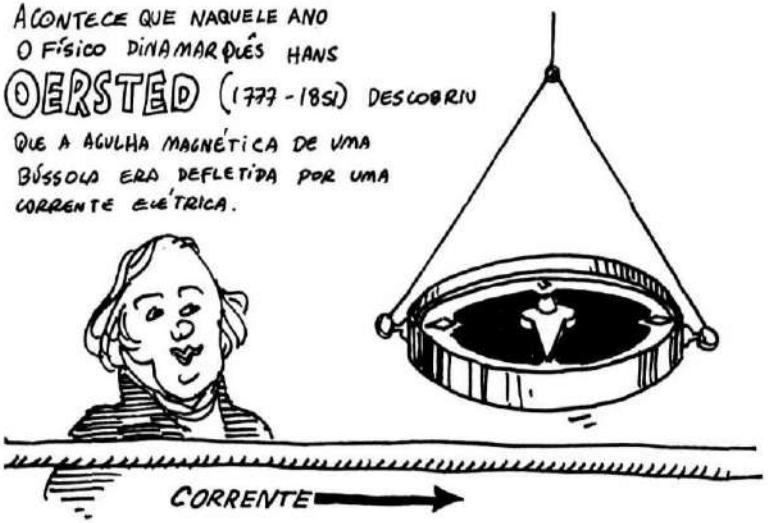


ATÉ O ANO DE

1820

TODO O MUNDO PENSAVA QUE MAGNETISMO E ELETRICIDADE ERAM COISAS TOTALMENTE SEPARADAS.

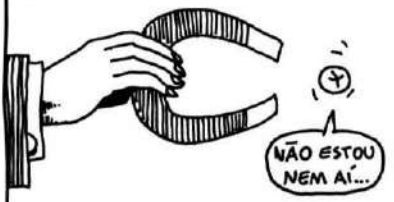
ACONTECE QUE NAQUELE ANO O FÍSICO DINAMARQUÊS HANS **OERSTED** (1777-1851) DESCOBRIU QUE A AGULHA MAGNÉTICA DE UMA BÚSSOLA ERA DEFLETIDA POR UMA CORRENTE ELÉTRICA.



ASSISTA AGORA: "A CARGA ELETRA NO DIVÃ DO ANALISTA"

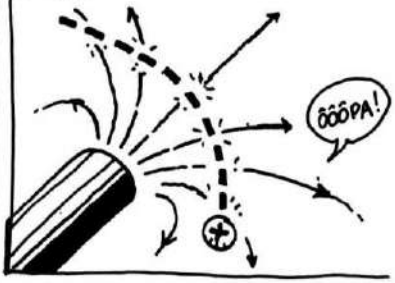
O QUE SENTE UMA CARGA NUM CAMPO MAGNÉTICO

PRIMEIRO, SE A CARGA **NÃO** ESTIVER SE MOVENDO, **NÃO SENTE FORÇA NENHUMA.**

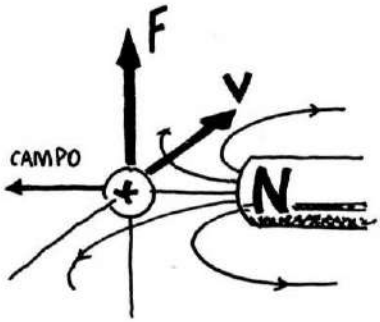


... E TAMBÉM **NÃO** SENTE FORÇA SE ESTIVER SE MOVENDO **AO LONGO** DAS LINHAS DE CAMPO...

... MAS SE A CARGA SE MOVE **CRUZANDO** AS LINHAS DE CAMPO, ENTÃO ELA **SENTE** ALGO!

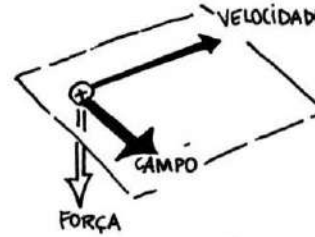


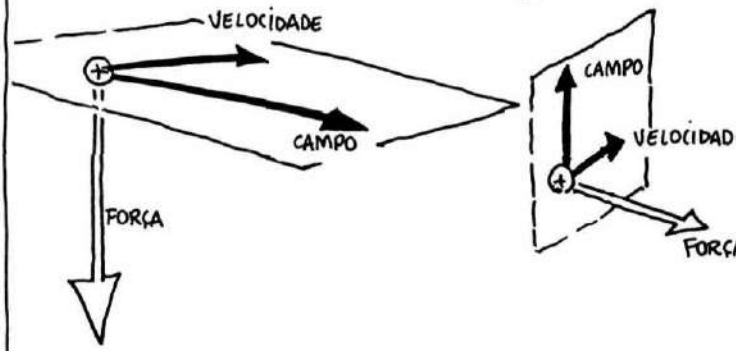
➡ A FORÇA SOBRE A CARGA É, ENTÃO, UMA FORÇA LATERAL, OU SEJA, É PERPENDICULAR TANTO ÀS LINHAS DE CAMPO COMO À VELOCIDADE DA CARGA:



OU SEJA...
CAMPOS MAGNÉTICOS PRODUZEM FORÇAS SOBRE CARGAS EM MOVIMENTO; FORÇAS QUE SÃO PERPENDICULARES À VELOCIDADE DAS CARGAS E TAMBÉM PERPENDICULARES À DIREÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO.

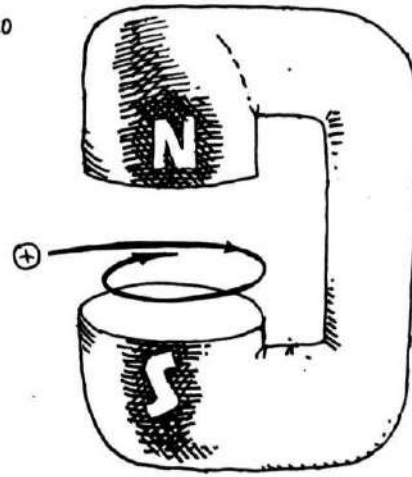
A INTENSIDADE DA FORÇA É PROPORCIONAL À INTENSIDADE DO CAMPO E À VELOCIDADE COM QUE A PARTÍCULA CRUZA O CAMPO. EIS ALGUNS EXEMPLOS PARA ILUSTRAR ESSA FORÇA ESTRANHA "TRIDIMENSIONAL", QUE ASSOCIA O CAMPO MAGNÉTICO À CARGA ELÉTRICA.



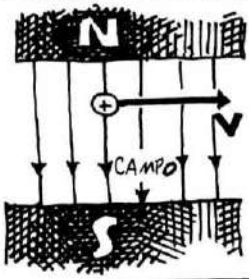


NOTE QUE AS DIREÇÕES DO CAMPO E DA VELOCIDADE DEFINEM UM PLANO, AO QUAL A FORÇA É PERPENDICULAR.

EIS AQUI UM CAMPO MAGNÉTICO QUE FAZ CIRCULAR DENTRO DELE CARGAS QUE ENTREM PERPENDICULARMENTE NO ESTREITO VÃO ENTRE OS DOIS PÓLOS DO ÍMÃ:

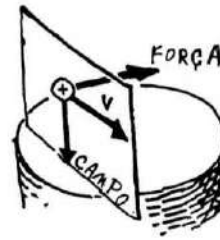


O CAMPO MAGNÉTICO ENTRE OS PÓLOS MANTÉM-SE PERPENDICULAR À VELOCIDADE, PORQUE A FORÇA É TAMBÉM PERPENDICULAR A ELE E

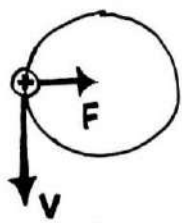


VISTA LATERA

ASSIM A CARGA REALIZA UM CÍRCULO NO PLANO PERPENDICULAR AO CAMPO.



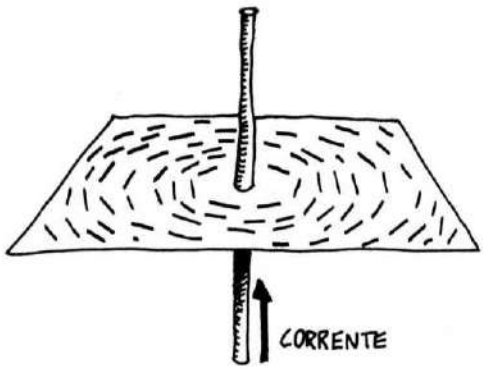
NA REALIDADE, A FORÇA MAGNÉTICA SOBRE A CARGA É UMA FORÇA CENTRÍPETA, QUE LEVA A CARGA A DESCREVER O MOVIMENTO CIRCULAR:



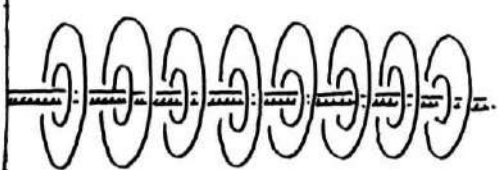
COM BASE NISSO É QUE SE CONSTROEM OS GRANDES ACELERADORES DE PARTÍCULAS, ASSIM COMO OS PEQUENOS, A EXEMPLO DOS TUBOS DE IMAGEM DOS APARELHOS DE TELEVISÃO...

ÍMÃS EXERCEM FORÇAS SOBRE PARTÍCULAS CARREGADAS, EM MOVIMENTO, E COMO OERSTED MOSTROU, CARGAS EM MOVIMENTO TAMBÉM CRIAM CAMPOS MAGNÉTICOS, POR EXEMPLO OS QUE DEFLETIRAM A BÚSSOLA DO OERSTED.

PARA EXAMINAR O CASO MAIS SIMPLES, BASTA ATRAVESSAR UM FIO CONDUTOR COM CORRENTE POR UMA CARTOLINA PLANA ONDE SE DEPOSITAM AGULHAS MAGNÉTICAS, OU SIMPLES LIMALHA DE FERRO:



AS AGULHAS OU A LIMALHA SE ALINHAM EM CÍRCULOS EM TORNO DO FIO.



O CAMPO MAGNÉTICO DE UMA CORRENTE RETILÍNEA SE DISPÕE CIRCULARMENTE EM PLANOS PERPENDICULARES À CORRENTE.

A GENTE PODE ENCONTRAR A DIREÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EM TORNO DE UM FIO, SEGURANDO O FIO COM A MÃO DIREITA, DE FORMA A TER O DEDÃO NA DIREÇÃO DA CORRENTE POSITIVA. OS DEMAIS DEDOS INDICARÃO O SENTIDO DO CAMPO.

ESTA É A FAMOSA

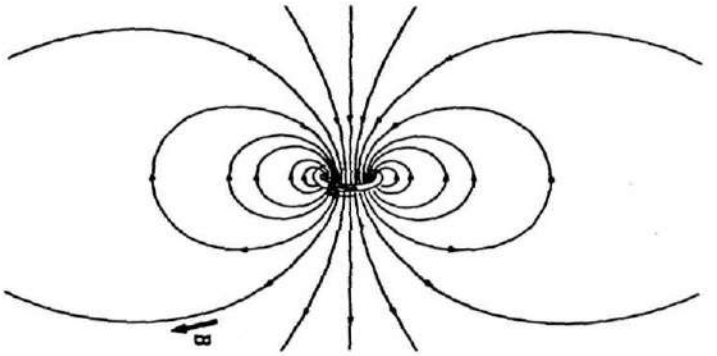
regra da mão direita

DUAS CORRENTES PARALELAS ATRAEM-SE RECIPROCAMENTE. O CAMPO MAGNÉTICO EM TORNO DE CADA FIO CAUSA FORÇAS SOBRE A CORRENTE DO OUTRO, PUXANDO-O. TENTE CONVENCER-SE DISSO USANDO A REGRA DA MÃO DIREITA.

AMPÈRE, DESCOBRIDOR DA FORÇA ENTRE CORRENTES PARALELAS

1775 - 1836

SE A GENTE ENCURVAR UM FIO COM CORRENTE, FORMANDO UM CÍRCULO, ELE PRODUZ ESSE CAMPO MAGNÉTICO:

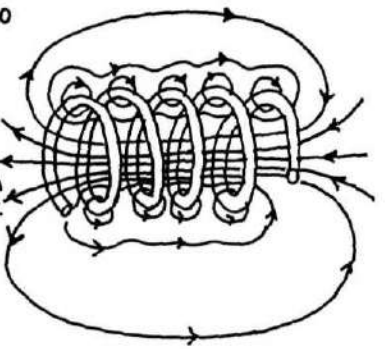


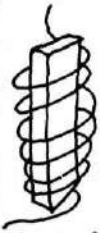
NOTE QUE DE UM LADO PARECE UM PÓLO **NORTE** - DE ONDE SAEM LINHAS DE CAMPO - DO OUTRO, PARECE UM PÓLO **SUL** - ONDE ENTRAM LINHAS.

DANDO VÁRIAS VOLTAS, FORMAM-SE VÁRIAS ESPIRAS E O CAMPO MAGNÉTICO FICA MAIS FORTE, QUANDO EM FORMA DE CILINDRO, TEMOS UMA

BOBINA SOLENÓIDE

COM UM CAMPO MAGNÉTICO COMO DE UMA BARRA DE MAGNETO, OU SEJA COMO UM PEDAÇO DE ÍMÃ PERMANTE.





INSERINDO UMA BARRA DE FERRO DENTRO DA BOBINA PODEMOS CONCENTRAR E REFORÇAR O CAMPO MAGNÉTICO, RESULTANDO NUM

ELETROÍMÃ

OU ELETROMAGNETO.

PODE SER MEIO ESTONTEANTE TANTO CAMPO ELÉTRICO, MAGNÉTICO... SE A SALA ESTIVESSE CHEIA DE CAMPOS, COMO VOCÊ FARIA PARA SABER QUE ELES ESTÃO LÁ E COMO SÃO?

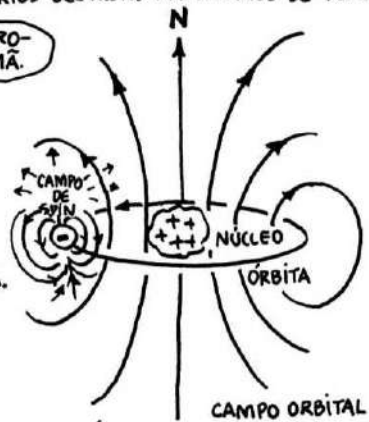
DE FATO, A SALA **ESTÁ MESMO** CHEIA DE CAMPOS. HÁ, POR EXEMPLO, CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA E OS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS DAS ONDAS EMITIDAS PELAS ESTAÇÕES DE RÁDIO E TV (OS CAMPOS ELÉTRICOS DESSAS ONDAS MOVEM ELÉTRONS NAS ANTENAS). A BÚSSOLA E OS APARELHOS RECEPTORES DETECTAM ESSES CAMPOS.

CAPÍTULO 18º
ÍMÃS PERMANENTES

TODOS OS CAMPOS MAGNÉTICOS CONHECIDOS RESULTAM DE CARGAS ELÉTRICAS EM MOVIMENTO.

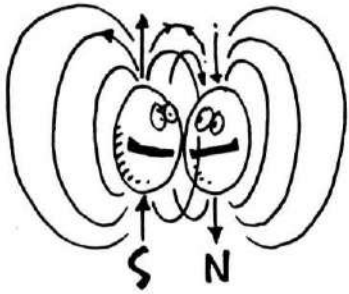
ONDE ESTÃO AS CARGAS QUE CRIAM O CAMPO MAGNÉTICO DE UM ÍMÃ PERMANENTE? ORA, SÃO OS PRÓPRIOS ELÉTRONS DOS ÁTOMOS DE FERRO!

UM ELÉTRON ORBITANDO EM TORNO DO NÚCLEO É COMO UMA PEQUENA CORRENTE CIRCULAR, PRODUZINDO UM **CAMPO MAGNÉTICO ORBITAL**. O ELÉTRON TAMBÉM PARECE* GIRAR EM SEU PRÓPRIO EIXO, GIRANDO UM **CAMPO MAGNÉTICO DE SPIN** (OU INTRÍNSECO).

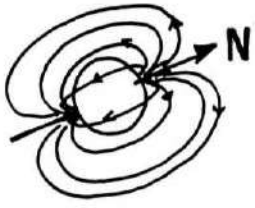


*N. do T.: "PARECE", PORQUE COMO O ELÉTRON TAMBÉM PARECE NÃO TER ESTRUTURA OU VOLUME, SERIA ESTRANHO QUE GIRASSE SOBRE SI MESMO...

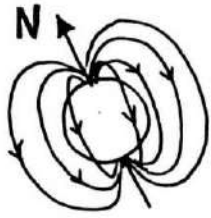
A MAIORIA DOS ELÉTRONS TEM SEUS CAMPOS MAGNÉTICOS CANCELADOS PELO CAMPO DE OUTROS ELÉTRONS...



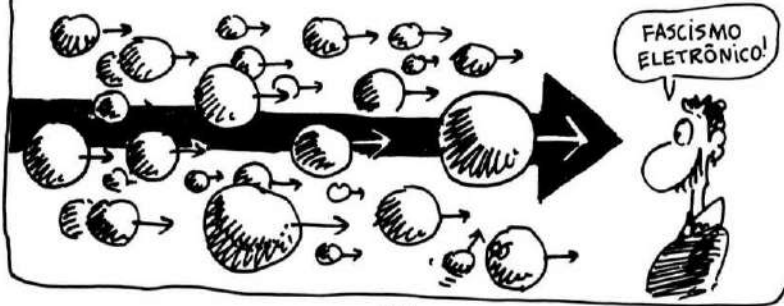
SÓ QUE NOS MATERIAIS **FERROMAGNÉTICOS**, COMO O **FERRO**, O **NÍQUEL** E O **COBALTO** — HÁ ELÉTRONS DESEMPARELHADOS QUE CONTRIBUEM PARA UM CAMPO MAGNÉTICO NÃO NULO EM CADA ÁTOMO...



E, ALÉM DISTO,



NESSES MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS, OS ÁTOMOS TAMBÉM SE ALINHAM COM SEUS CAMPOS APONTANDO NUMA MESMA DIREÇÃO, RESULTANDO EM UM GRANDE CAMPO:



DENTRO DO MATERIAL FERROMAGNÉTICO HÁ SEMPRE REGIÕES ONDE OS ÁTOMOS ESTÃO ALINHADOS, SÃO OS **DOMÍNIOS MAGNÉTICOS**. ACONTECE QUE OS DOMÍNIOS NÃO ESTÃO EM GERAL ALINHADOS ENTRE SI. SE A GENTE COLOCA UM PEDAÇO DE FERRO NUM CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO FORTE, ORIENTAM-SE OS DOMÍNIOS E O FERRO FICA MAGNETIZADO.

NÃO MAGNETIZADO

MAGNETIZADO

ALGUMAS LIGAS METÁLICAS SÃO ESPECIAIS QUANTO À MAGNETIZAÇÃO – SÃO CHAMADAS "DURAS" POIS SÃO DIFÍCEIS DE ALINHAR, MAS UMA VEZ ORIENTADAS, SÃO TAMBÉM DURAS PARA DESMAGNETIZAR. É O CASO DO

ALNICO V,

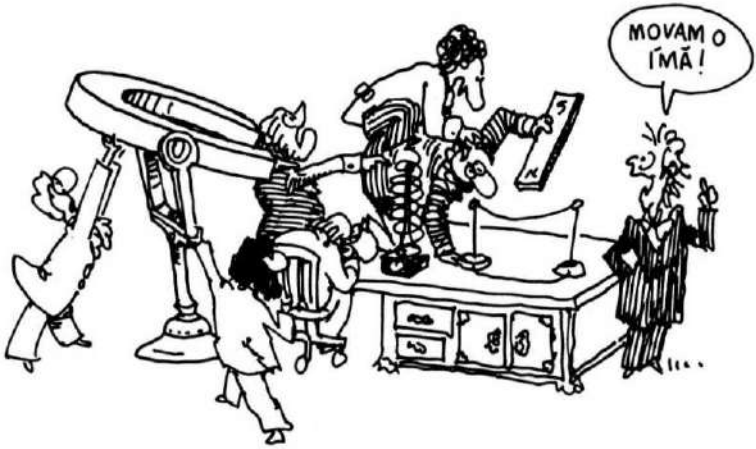
UMA LIGA DE ALUMÍNIO, NÍQUEL, COBALTO, COBRE E FERRO. O FERRO PURO É MAGNETICAMENTE "MACIO", FÁCIL DE MAGNETIZAR NUM CAMPO EXTERNO MAS TAMBÉM FÁCIL DE DESMAGNETIZAR SEM ESSE CAMPO.

O EFEITO FERROMAGNÉTICO OPERA SÓ ABAIXO DE UMA CERTA TEMPERATURA CRÍTICA QUE PARA O FERRO É 770°C. ESQUENTAR O FERRO ACIMA DISSO DESMANCHA O FERROMAGNETISMO.

PRESUME-SE QUE O MAGNETISMO TERRESTRE SE DEVA À CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NO NÚCLEO DO PLANETA. O EXATO MECANISMO É AINDA UM MISTÉRIO. E É CURIOSO QUE UM DOS PRIMEIROS EFEITOS MAGNÉTICOS A SER DESCOBERTO AINDA NÃO TENHA SIDO EXPLICADO!

◦CAPÍTULO 19◦
INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

NOS DOZE ANOS QUE SE SEGUIRAM À DESCOBERTA DE OERSTED, OS ESTUDIOSOS DE ELETRICIDADE PROCURARAM O EFEITO INVERSO, OU SEJA, PRODUZIR CORRENTE POR MEIO DE UM CAMPO MAGNÉTICO. FINALMENTE, EM 1832, MICHAEL **FARADAY** SUGERIU:



QUANDO O RINGO ARREMESSA UMA BARRA IMANTADA DENTRO DE UM ARO DE FIO LIGADO A UM GALVANÔMETRO, OU SEJA, DE UM MEDIDOR ELÉTRICO, O PONTEIRO MEXE!

SE A BARRA FOR MANTIDA PARADA, O MEDIDOR NÃO SINALIZA NADA.

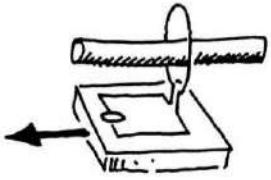
OUTRA FORMA DE INDUÇÃO DE CORRENTE SE DÁ PELA PROXIMIDADE DE UM SEGUNDO ARO, NO INSTANTE EM QUE ESTE É LIGADO OU DESLIGADO DE UMA BATERIA.

MAS SE A CORRENTE FOR CONTÍNUA, MANTENDO-SE A CHAVE LIGADA, **NÃO** HÁ INDUÇÃO DA CORRENTE NO OUTRO CIRCUITO.

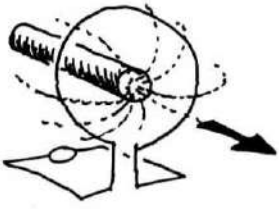
FARADAY DESCREVEU ISSO DIZENDO QUE UMA **FORÇA ELETRO-MOTRIZ** É GERADA NUM FIO SEMPRE QUE ELE É CORTADO POR LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICAS.

NÃO IMPORTA SE É O CAMPO MAGNÉTICO QUE SE MOVE, OU SE É O FIO QUE SE MOVE, DESDE QUE UM SE MOVA EM RELAÇÃO AO OUTRO E QUE LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO INVADAM O ARO, OU CRUZEM O FIO.

O SORVETE NA BOCA OU A BOCA NO SORVETE?



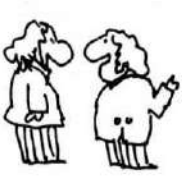
QUANDO O ÍMÃ É ARREMESSADO ATRAVÉS DO ARO, SUAS LINHAS DE CAMPO CRUZAM O FIO DO ARO, GERANDO A **FEM** QUE PRODUZ UMA CORRENTE.



O MESMO ACONTECE QUANDO É O ARO QUE SE MOVE, ENVOLVENDO O ÍMÃ.

NO CASO DE DOIS AROS OU ESPIRAS, NO INSTANTE EM QUE SE LIGA A CORRENTE EM UM CIRCUITO, SURGEM LINHAS DE CAMPO QUE INVADEM O OUTRO.

O MESMO ACONTECE QUANDO SE DESLIGA, E AS LINHAS DE CAMPO SE RETRAEM, CRUZANDO DE VOLTA.



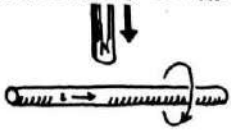
LEVARAM DOZE ANOS PRA TER A IDÉIA DE MOVER O ÍMÃ?!

É DIVERTIDA A TAL DA INDUÇÃO, MAS DE UTILIDADE DUVIDOSA...
POIS É, EU QUERIA ERA INVESTIGAR O QUE É QUE GENTE COMO FARADAY TEM NA CABEÇA...
LA PHRENOLOGIE

APESAR DE A DESCOBERTA DE FARADAY TER SIDO INICIALMENTE RECEBIDA COM INDIFERENÇA, TODA A ENERGIA ELÉTRICA QUE CONSUMIMOS HOJE É GERADA MOVENDO-SE GIGANTESCOS ELETROÍMAS NA PROXIMIDADE DE BOBINAS CONDUTORAS (OU VICE-VERSA!)

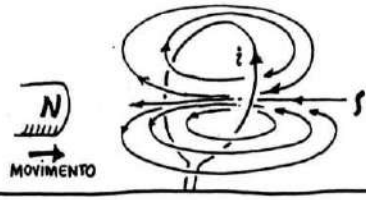
A ENERGIA CINÉTICA DA ÁGUA QUE CAI NUMA USINA HIDROELÉTRICA VAI MOVER TURBINAS QUE FAZEM GIRAR UM GERADOR, OU SEJA, MOVEM RELATIVAMENTE CAMPOS MAGNÉTICOS E ENROLAMENTOS DE FIOS. A GENTE, EM CASA, APERTA O BOTÃO, ACENDE A LUZ E NEM QUER SABER DE ONDE VEIO A ENERGIA...

OLHEMOS UM POUCO MAIS PARA O EXPERIMENTO DE FARADAY: QUANDO SE MOVE O ÍMÃ PRÓXIMO AO ARO OU ESPIRA METÁLICA, SURGE A CORRENTE. DE ONDE VEM A **ENERGIA** QUE FAZ BALANÇAR O PONTEIRO DO GALVANÔMETRO OU FAZ PISCAR UMA LAMPADINHA?



ORA, QUANDO A CORRENTE INDUZIDA SURGE NO FIO, ELA TAMBÉM PRODUZ UM CAMPO MAGNÉTICO QUE RESISTE AO MOVIMENTO DO ÍMÃ. É PRECISO ENTÃO TRABALHO PARA MOVÊ-LO.

QUANDO O RINGO ARREMESSOU O ÍMÃ, COM O PÓLO NORTE PARA A FRENTE, A CORRENTE INDUZIDA RESULTANTE GERA UM PÓLO NORTE O QUAL REPELE O PÓLO DO ÍMÃ QUE SE APROXIMA.



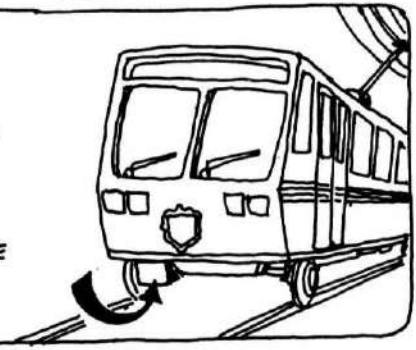
ISSO É CONHECIDO COMO

LEI DE LENZ*:

A CORRENTE INDUZIDA FLUI SEMPRE NA DIREÇÃO QUE PROMOVA OPOSIÇÃO À MUDANÇA QUE A PRODUZIU.

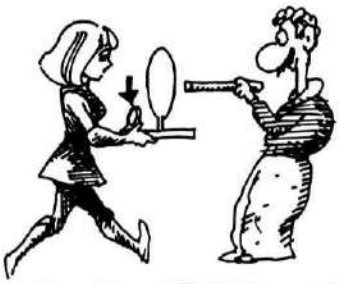
*LEMBRETE: COMO LENZ ERA ALEMÃO, SEU NOME SE PRONUNCIA "LENTS"...

A LEI DE LENZ DECORRE DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA. UM USO PRÁTICO DELA SÃO CERTOS **FREIOS** (USADOS EM METRÔS E ÔNIBUS ELÉTRICOS); UM ELETROÍMÃ É POSTO PRÓXIMO DO TRILHO, NO QUAL É INDUZIDA UMA CORRENTE QUE SE OPÕE À DO ELETROÍMÃ, FREIANDO O MOVIMENTO.

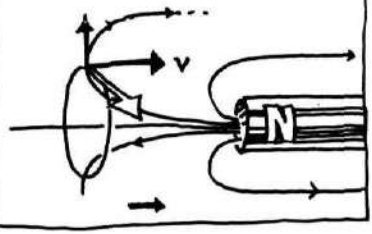


◊CAPÍTULO 20◊
RELATIVIDADE

VOLTEMOS À EXPERIÊNCIA DE FARADAY. EU SEGURO A ESPIRA, RINGO SEGURA O ÍMÃ. QUANDO EU MOVO A ESPIRA, MEXE O PONTEIRO DO GALVANÔMETRO.



ISSO É FÁCIL DE ENTENDER: O FIO TEM CARGAS; SE ELAS SE MOVEM, ELAS SENTEM A FORÇA MAGNÉTICA LATERAL (LEMBRA?) QUE ENTÃO AS IMPELE AO LONGO DA ESPIRA!



MAS QUAL É A EXPLICAÇÃO, QUANDO O RINGO SE MOVE E EU FICO PARADA?

QUAL SERIA? VAMOS VER... DIGAMOS... ORA, TALVEZ...

SABEMOS QUE UMA CORRENTE FOI INDUZIDA; MAS O QUE TERÁ FEITO ISSO? COMO AS CARGAS NÃO ESTÃO SE MOVENDO INICIALMENTE, O CAMPO MAGNÉTICO NÃO PODERIA AFETÁ-LAS...

SE CARGAS SÃO MOVIDAS OU POR CAMPO MAGNÉTICO OU POR CAMPO ELÉTRICO, É PRECISO ACHAR UM CAMPO ELÉTRICO NESSE CASO.

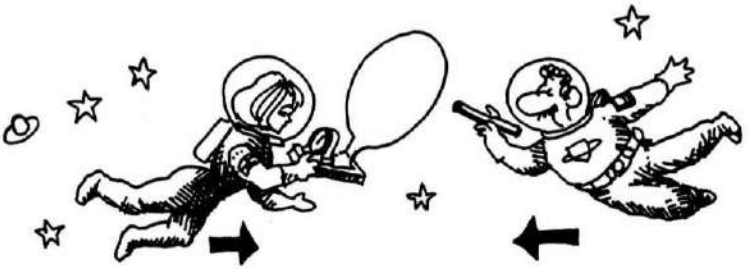
BRILHANTE! SENSACIONAL!

TAMBÉM, DEPOIS DE 170 PÁGS... EU TINHA QUE DAR AO MENOS UMA DENTRO...

O QUE RINGO DEDUZIU FOI ALGO QUE PRECISOU DE UM **EINSTEN** PRA SER EXPLICADO; O QUE É DEVIDO A UM CAMPO MAGNÉTICO NUMA CIRCUNSTÂNCIA, PODE SER DEVIDO A UM CAMPO ELÉTRICO EM OUTRA; O QUE UM

OBSERVADOR INTERPRETA COMO MAGNÉTICO OUTRO OBSERVADOR INTERPRETA COMO ELÉTRICO...

MAIS UMA VEZ, AINDA..., A EXPERIÊNCIA DE FARADAY. SÓ QUE AGORA NO ESPAÇO SIDERAL, ONDE A GENTE NÃO VAI MESMO PODER DEFINIR QUAL DOS DOIS ESTÁ "REALMENTE" SE MOVENDO.



EU ESTOU CERTA DE ESTAR PARADA E DE QUE RINGO SE MOVE. EU DETECTO UM CAMPO MAGNÉTICO, QUE NÃO MOVE CARGAS, MAS HÁ TAMBÉM UM CAMPO ELÉTRICO, GERADO PELO CAMPO MAGNÉTICO VARIÁVEL.

RINGO ESTÁ CERTO DE QUE ELE ESTÁ PARADO E DE QUE EU ESTOU ME MOVENDO. ELE DETÉCTA SÓ UM CAMPO MAGNÉTICO E CARGAS EM MOVIMENTO, QUE JUSTIFICAM ASSIM A CORRENTE INDUZIDA.

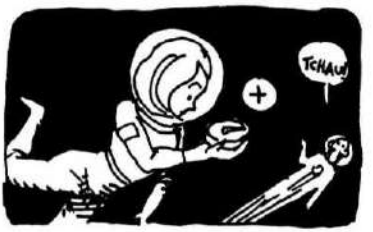
RINGO E EU DISCORDAMOS SOBRE QUAIS CAMPOS ESTÃO PRESENTES!

ISSO É TÍPICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE: DOIS OBSERVADORES, COMO RINGO E EU, SE ESTIVEREM SE MOVENDO UM RELATIVAMENTE AO OUTRO, DISCORDARÃO QUANTO AO RESULTADO DE MEDIDAS QUE FIZERAM DE IMPORTANTES GRANDEZAS FÍSICAS!

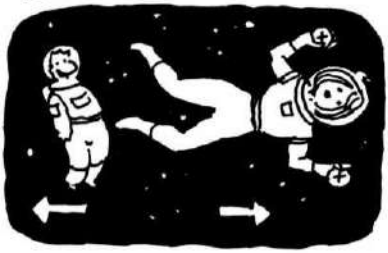
AQUI VAI UMA EXPLICAÇÃO AINDA MAIS SIMPLES: UMA CARGA SOZINHA CRUZA O ESPAÇO AO LADO DE RINGO:

RINGO VÊ UMA CARGA QUE SE MOVE, OU SEJA, UMA CORRENTE ELEMENTAR QUE PRODUZ CAMPO MAGNÉTICO. A BÚSSOLA DE RINGO DETECTA ESTE CAMPO,

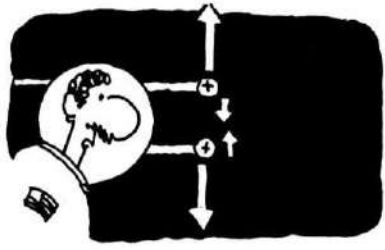
MAS EU ME MOVO JUNTO COM A CARGA E A VEJO PARADA. NÃO HÁ CAMPO MAGNÉTICO E MINHA BÚSSOLA NÃO INDICA NADA.



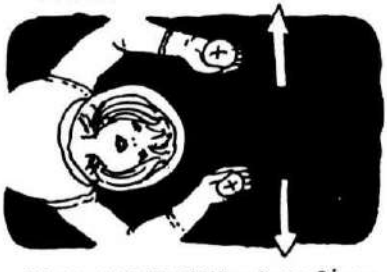
E EIS A DEMONSTRAÇÃO FINAL: VEJA BEM, EU LEVO **DUAS** CARGAS LADO A LADO, À FRENTE DO RINGO.



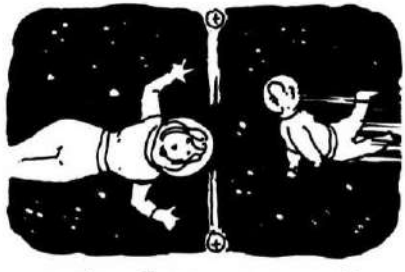
ELAS SE REPELEM ELETRICAMENTE, MAS RINGO AS VÊ SE MOVENDO: DUAS CORRENTES PARALELAS QUE, PORTANTO, SE ATRAEM MAGNETICAMENTE, ALÉM DE SE REPELIREM.



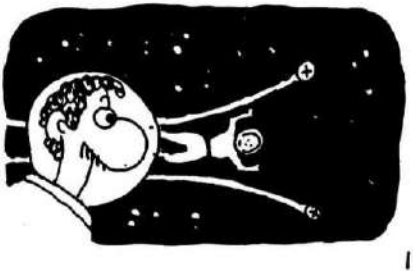
MAS, PARA MIM, ELAS ESTÃO PARADAS E EU SÓ VEJO A REPULSÃO.



ENTÃO, EU SOLTO AS CARGAS E ELAS SE AFASTAM.



NOTEM QUE ESTRANHO: COMO RINGO VÊ A ATRAÇÃO MAGNÉTICA PARCIALMENTE COMPENSANDO A REPULSÃO, ELE VÊ AS CARGAS SE AFASTANDO MAIS DEVAGAR DO QUE EU AS VEJO.

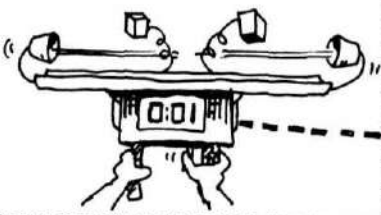


ENFIM, RINGO QUE SE MOVE RELATIVAMENTE A MIM, AO MEDIR A VELOCIDADE DE AFASTAMENTO DAS CARGAS CHEGA A UM VALOR MENOR DO QUE QUANDO EU MEÇO.

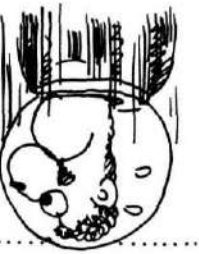
EIS UM APARELHO PARA MEDIR A VELOCIDADE DE AFASTAMENTO DAS CARGAS.

PUXANDO-SE O GATILHO **A**, SOLTAM-SE OS BLOCOS **B**, O QUE ACIONA O CRONÔMETRO **C** AO MESMO TEMPO EM QUE PARTEM AS CARGAS **Q**, UMA PARA CADA LADO. AS CARGAS ATINGEM OS DETECTORES **D**, QUE DESLIGAM O CRONÔMETRO **C**.

EU, PARADA DIANTE DO APARELHO, NOTO QUE O PROCESSO TODO LEVOU 0,01 S.



MAS O RINGO, COMO VIMOS, CRÊ QUE HÁ UMA ATRAÇÃO MAGNÉTICA QUE DIMINUI A REPULSÃO E ATRASA O AFASTAMENTO DAS CARGAS.



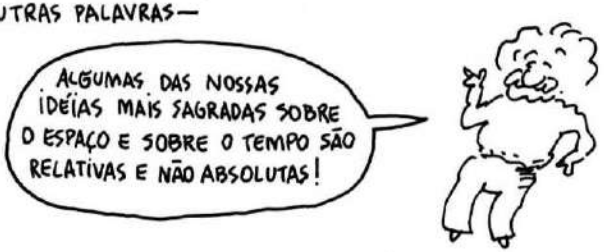
RINGO MEDE UM **TEMPO MAIOR** PARA O PROCESSO, DIGAMOS 0,02 S. ELE TAMBÉM VÊ QUE MEU CRONÔMETRO SÓ ANDOU 0,01 S ENQUANTO O DELE MARCOU 0,02 S. CONCLUSÃO?

O QUE DEVE PENSAR O RINGO? COMO ELE VÊ MEU RELÓGIO ANDAR 0,01 S ENQUANTO O DELE ANDA O DOBRO, SÓ RESTA A ELE INCLUIR QUE MEU MOVIMENTO RÁPIDO FAZ MEU RELÓGIO ATRASAR!!

É ASSIM MESMO, E ESSA NÃO É A ÚNICA COISA MALUCA QUE A TEORIA RELATIVÍSTICA DE EINSTEIN ESTABELECEU; VISTO POR UM OBSERVADOR PARADO, PARA OBJETOS EM VELOCIDADE MUITO ALTA:

* O TEMPO PASSA MAIS DEVAGAR
* O COMPRIMENTO ENCOLHE (NA DIREÇÃO DO MOVIMENTO)
* A MASSA CRESCE

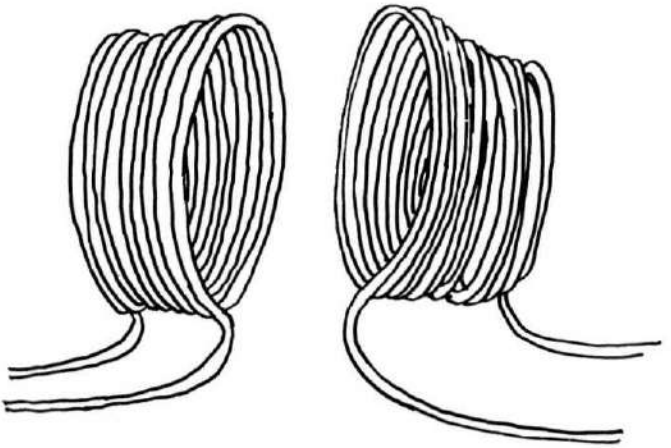
NOUTRAS PALAVRAS—



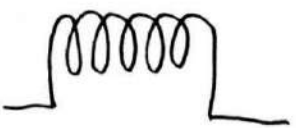
VIMOS QUE O EFEITO DE DILATAÇÃO DO TEMPO DERIVA-SE DE FATOS BÁSICOS, OBSERVADOS, DA ELETRICIDADE E DO MAGNETISMO. OS FÍSICOS JÁ SABIAM, NO FIM DO SÉCULO DEZENOVE, QUE AS EQUAÇÕES DO ELETROMAGNETISMO NÃO ESTAVAM EM ACORDO COM A MECÂNICA DE NEWTON, E MUITOS PENSAVAM EM MUDAR AQUELAS EQUAÇÕES DE ALGUMA FORMA...

...MAS EINSTEIN VIU QUE NÃO ERA O ELETROMAGNETISMO QUE TINHA DE SER MUDADO E QUE, POR OUTRO LADO, ERAM OS PRÓPRIOS CONCEITOS DE ESPAÇO E TEMPO QUE PRECISAVAM SER REVISTOS...

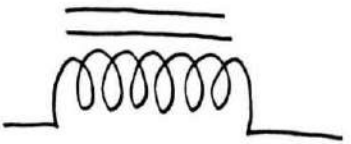
◊CAPÍTULO 21◊
INDUTORES



UM INDUTOR É SIMPLESMENTE UMA BOBINA DE FIO CONDUTOR. ÀS VEZES ELA PODE ENVOLVER UM NÚCLEO DE FERRO, QUE AMPLIFICA EFEITOS MAGNÉTICOS. SEU SÍMBOLO ELÉTRICO É:

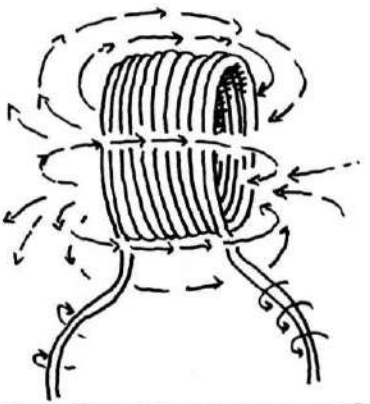


INDUTOR **L**



INDUTOR **L** COM NÚCLEO DE FERRO

SE UMA CORRENTE CIRCULA NUM INDUTOR, UM CAMPO MAGNÉTICO SURGE ENVOLVENDO-O, COMO JÁ VIMOS.



SE A CORRENTE SE MODIFICA, LINHAS DE CAMPO CRUZAM A PRÓPRIA FIAÇÃO DA BOBINA, PROVOCANDO O EFEITO DE

AUTO-INDUÇÃO.

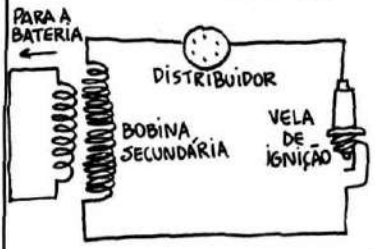
PELA LEI DE LENZ, A **FEM** INDUZIDA SE OPÕE À MUDANÇA QUE A PRODUZIU. SE VOCÊ TENTAR LIGAR A CORRENTE, A FEM AUTO-INDUZIDA RESISTIRÁ E A CORRENTE SÓ CRESCERÁ DEVAGAR. IGUALMENTE, AO TENTAR DESLIGAR, A FEM AUTO-INDUZIDA TENTA MANTER A CORRENTE FLUINDO.

ESSAS FEMS PODEM ATINGIR MILHARES DE VOLTS. POR EXEMPLO, QUANDO VOCÊ ABRE UMA CHAVE ELÉTRICA, SURGE ATÉ UMA FAÍSCA NO AR QUE MANTÉM A CORRENTE POR UM MOMENTO.

ESSE EFEITO TEM MUITOS USOS, POR EXEMPLO NA IGNIÇÃO DO AUTOMÓVEL.

A BOBINA TEM, NO CASO, DOIS ENROLAMENTOS, UM PRIMÁRIO DE, DIGAMOS, 100 VOLTAS DE FIO MÉDIO E UM SECUNDÁRIO DE, DIGAMOS, 1000 VOLTAS DE FIO FINO. O PRIMÁRIO É ENERGIZADO (ATRAVÉS DE DISTRIBUIDOR E PLATINADO)* PELA BATERIA (P. EX., 12 VOLTS). QUANDO O PLATINADO ABRE O CIRCUITO, O CAMPO MAGNÉTICO QUE CAI INDUZ CORRENTE NO SECUNDÁRIO. A FEM INDUZIDA É AMPLIFICADA PELAS MUITAS VOLTAS E GERA UM PULSO MOMENTÂNEO DE CERCA DE

50.000 VOLTS!!

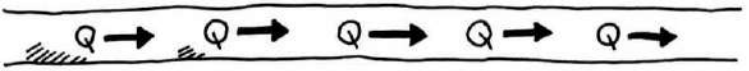


ISSO VAI DO DISTRIBUIDOR PARA AS VELAS QUE INCENDEIAM A GASOLINA. NOTE QUE SE PARTE DE UNS POUCOS VOLTS DA BATERIA...

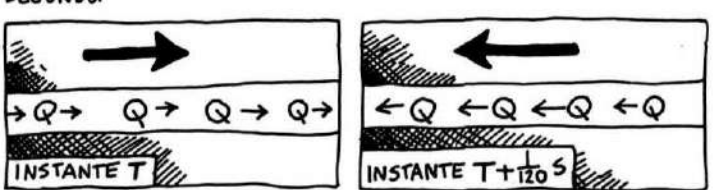
* NOS CARROS MODERNOS ISSO JÁ É ELETRÔNICO.

CAPÍTULO 22
CORRENTE CONTÍNUA E CORRENTE ALTERNADA

ATÉ AQUI A GENTE SÓ LIDOU COM A CORRENTE CONTÍNUA (**CC**),* UM FLUXO DE CARGA SEGUINDO "FIO ABAIXO."



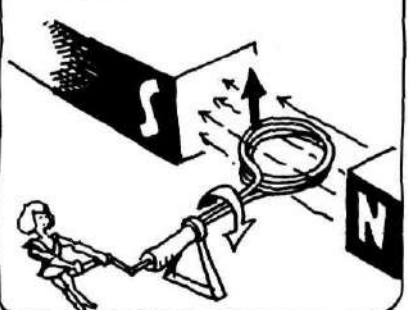
MAS, MUITO FREQÜENTEMENTE, A GENTE USA A CORRENTE ALTERNADA (**CA**),** NA QUAL O FLUXO DE CARGA VAI MUDANDO TODO O TEMPO. NO CIRCUITO RESIDENCIAL, O SENTIDO DA CORRENTE SE ALTERNA 120 VEZES A CADA SEGUNDO, POIS SÃO 60 CICLOS COMPLETOS POR SEGUNDO.



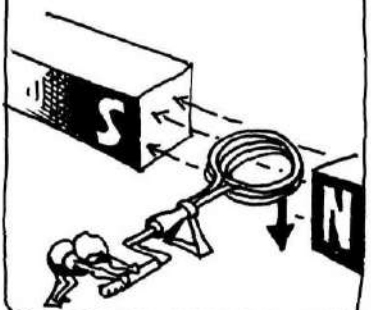
* **N. do T.**: CC = DC "DIRECT CURRENT" EM INGLÊS.
** **N. do T.**: CA = AC "ALTERNATING CURRENT" EM INGLÊS.

EU POSSO GERAR UMA CORRENTE ALTERNADA FAZENDO GIRAR ESTE INDUTOR EM FORMA DE BATEDEIRA DE OVO DENTRO DE UM CAMPO MAGNÉTICO DE UM ÍMÃ. A CORRENTE SURGE À MEDIDA QUE OS FIOS DO INDUTOR CRUZAM AS LINHAS DE CAMPO.

A CORRENTE É ALTERNADA PORQUE A ESPIRA CORTA O CAMPO NUM SENTIDO...



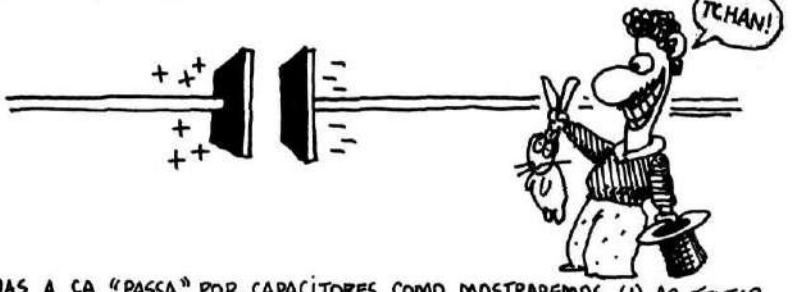
...E ENTÃO NO OUTRO SENTIDO, MEIA-VOLTA DEPOIS.



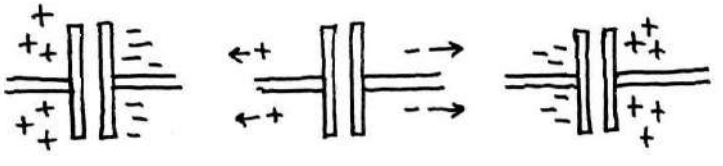
A CA GERADA ASSIM PODE SER RECOLHIDA POR UMA "ESCOVA METÁLICA" QUE DESLIZA SOBRE UM ANEL DE CONTATO. ASSIM É GERADA A MAIOR PARTE DA ENERGIA ELÉTRICA.

CAPACITORES E INDUTORES COMPORTAM-SE DIFERENTEMENTE, TANTO EM CC QUANTO EM CA. A FEM INDUZIDA NUM INDUTOR OPÕE-SE A MUDANÇAS DE CORRENTE, DE FORMA QUE O INDUTOR RESISTE A CORRENTE ALTERNADA.

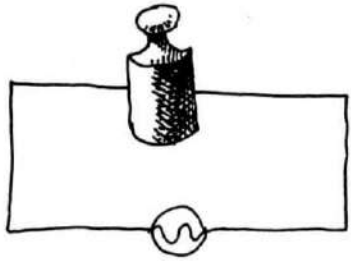
VEJAMOS AGORA NUM CAPACITOR:
A CC NÃO PASSA, É CLARO, POR UM CAPACITOR, POIS AS DUAS FOLHAS SÃO ISOLADAS ENTRE SI...



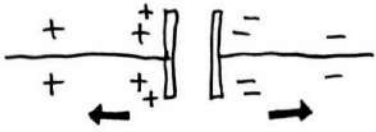
MAS A CA "PASSA" POR CAPACITORES COMO MOSTRAREMOS. (1) AO TENTAR FLUIR NUM SENTIDO, A CORRENTE CARREGA O CAPACITOR. (2) LOGO EM SEGUIDA, AO SE INVERTER O SENTIDO, O CAPACITOR SE DESCARREGA E DEPOIS (3) CARREGA-SE OPOSTAMENTE À FORMA ANTERIOR. ASSIM, MESMO QUE AS CARGAS NÃO CRUZEM O CAPACITOR, A CORRENTE VAI ESTAR O TEMPO TODO FLUINDO DE UM LADO PARA O OUTRO NO FIO.



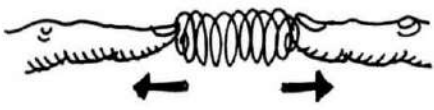
A RESISTÊNCIA DE UM INDUTOR À **CA** DÁ A ELE UM CARÁTER DE INÉRCIA. DE FATO, UM INDUTOR É UM ANÁLOGO ELÉTRICO DA MASSA.



SE UM INDUTOR LEMBRA A MASSA, UM CAPACITOR LEMBRA A MOLA: QUANDO A GENTE TENTA BOMBEAR MAIS CARGA, NUM CAPACITOR JÁ CARREGADO, ELE O EMPURRA DE VOLTA.

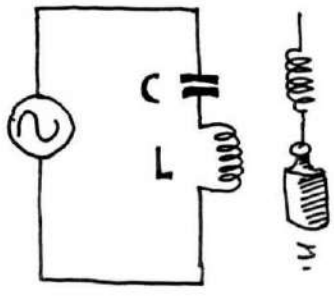


O CAPACITOR REPELE A CARGA ADICIONADA

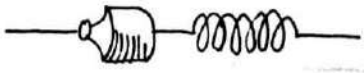


A MOLA REPELE A PRESSÃO ADICIONADA

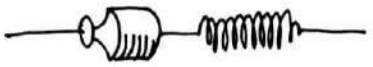
SE A GENTE LIGA UM INDUTOR E UM CAPACITOR NUM CIRCUITO DE **AC**, O RESULTADO É O EQUIVALENTE ELÉTRICO DE UMA MASSA PRESA A UMA MOLA!



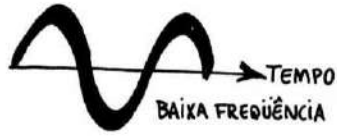
ASSIM COMO UM OSCILADOR DE MASSA E MOLA,
UM CIRCUITO **LC** TENDE A VIBRAR, A OSCILAR,
A UMA FREQÜÊNCIA PREFERENCIAL OU DE RESSONÂNCIA.

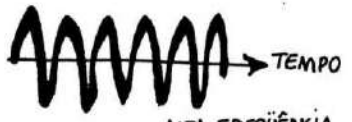


MOLA Nº 1

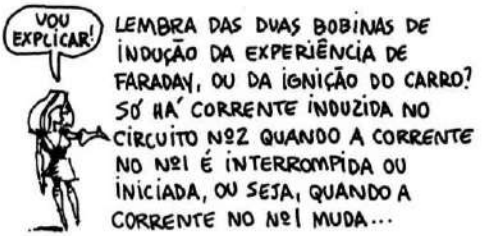


MOLA Nº 2

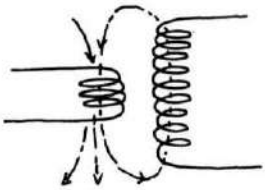




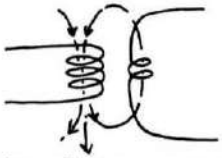
UM CIRCUITO OSCILADOR, COMO O LC QUE VIMOS, PODE SERVIR PARA GERAR UMA FREQÜÊNCIA DE UMA EMISSORA, OU PARA SINTONIZAR UMA NUM RECEPTOR.
SE VOCÊ É O ÚLTIMO OUVINTE A SINTONIZAR ESSA EMISORA, POR FAVOR DESLIGUE, E VAMOS TODOS DORMIR...


VOU EXPLICAR!
LEMBRA DAS DUAS BOBINAS DE INDUÇÃO DA EXPERIÊNCIA DE FARADAY, OU DA IGNIÇÃO DO CARRO? SÓ HÁ CORRENTE INDUZIDA NO CIRCUITO Nº2 QUANDO A CORRENTE NO Nº1 É INTERROMPIDA OU INICIADA, OU SEJA, QUANDO A CORRENTE NO Nº1 MUDA...
1.
2.

O MELHOR É O SEGUINTE: A VOLTAGEM INDUZIDA É PROPORCIONAL AO NÚMERO DE VOLTAS; QUANTO MAIS VOLTAS TIVER A BOBINA Nº2, EM COMPARAÇÃO COM A Nº1, MAIOR A VOLTAGEM (OU TENSÃO) INDUZIDA NA Nº2.



AUMENTO DE VOLTAGEM



REDUÇÃO DE VOLTAGEM

É FÁCIL VER POR QUÊ: QUANTO MAIS FIOS FOREM CRUZADOS PELAS LINHAS DE CAMPO, MAIS FEM É GERADA. SE

N_P = Nº DE VOLTAS DO PRIMÁRIO

N_S = Nº DE VOLTAS DO SECUNDÁRIO

ENTÃO

$$V_{SAÍDA} = \frac{N_S}{N_P} V_{ENTRADA}$$

UM APARELHO COMO ESSE, PRA AMPLIAR OU REDUZIR TENSÃO, CHAMA-SE

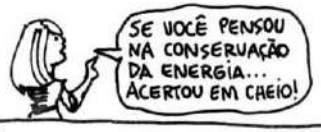
TRANSFORMADOR.

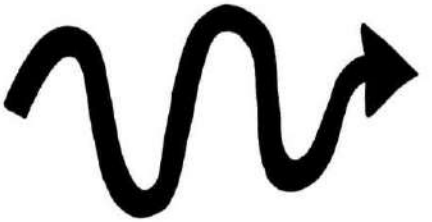
E TEM O SÍMBOLO

E SÓ FUNCIONA EM **CA**.

UM TRANSFORMADOR FAZ CRESCEREM OU DIMINUÍREM AS TENSÕES, MAS NÃO A POTÊNCIA, QUE NÃO PODE SER MAIOR NA SAÍDA DO QUE ERA NA ENTRADA. NOUTRAS PALAVRAS, AUMENTANDO A VOLTAGEM DEVE CAIR A CORRENTE.

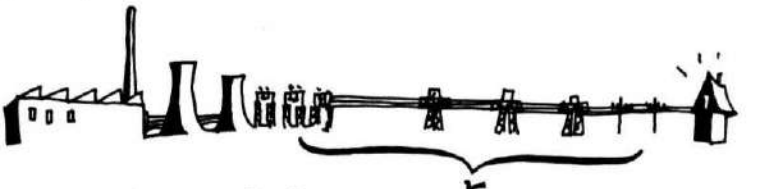
$$P_{SAÍDA} = V_S i_S \leq P_{ENTRADA} = V_E i_E$$





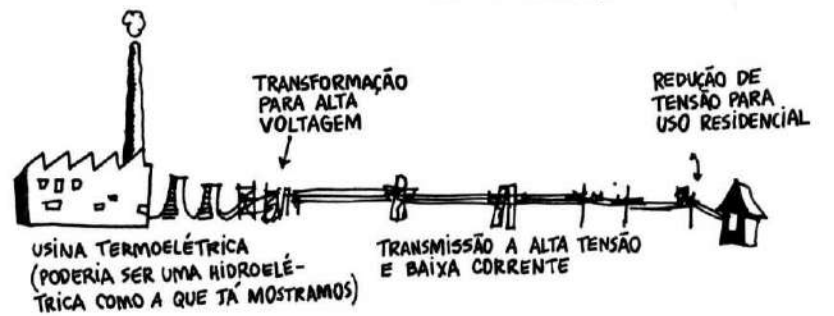
EIS, PORTANTO, A GRANDE VANTAGEM DA CORRENTE ALTERNADA: SUA VOLTAGEM PODE SER FACILMENTE AUMENTADA OU DIMINUÍDA.

ISSO É ESPECIALMENTE IMPORTANTE NA PASSAGEM ENTRE AS USINAS DE GERAÇÃO ELÉTRICA E OS CLIENTES QUE ELAS SERVEM.



AS LINHAS DE TRANSMISSÃO TÊM UMA RESISTÊNCIA r, DE FORMA QUE HÁ UMA QUEDA DE VOLTAGEM $V=ir$ E UMA PERDA DE POTÊNCIA $P=iv=i^2r$ AO LONGO DA LINHA. SE A CORRENTE POR ALTA, O DESPERDÍCIO É ENORME.

SUBINDO A TENSÃO PARA ALTA VOLTAGEM (MAIS DE 100.000 VOLTS!) A CORRENTE PODE SER TORNADA BEM MENOR E MINIMIZA-SE A PERDA. SÓ QUE NA HORA DE USAR, TEM QUE SER REDUZIDA OUTRA VEZ A VOLTAGEM.


TRANSFORMAÇÃO PARA ALTA VOLTAGEM
REDUÇÃO DE TENSÃO PARA USO RESIDENCIAL
USINA TERMOELÉTRICA (PODERIA SER UMA HIDROELÉTRICA COMO A QUE JÁ MOSTRAMOS)
TRANSMISSÃO A ALTA TENSÃO E BAIXA CORRENTE

ASSIM, O SIMPLES TRANSFORMADOR DETERMINOU TODO O NOSSO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA E, SALVO POUCAS EXCEÇÕES OS APARELHOS ESTÃO ADAPTADOS PARA OPERAR COM CORRENTE ALTERNADA.

DEVIDO À INVENÇÃO DE

SUPERCONDUTORES

QUE OPERAM A TEMPERATURAS MAIS RAZOÁVEIS E TAMBÉM A NOVOS DISPOSITIVOS DE ALTA TECNOLOGIA PARA TRANSFORMAR CORRENTES CONTÍNUAS, NO FUTURO PRÓXIMO NÓS JÁ PODEREMOS ESTAR USANDO MUITAS LINHAS DE TRANSMISSÃO EM CC.

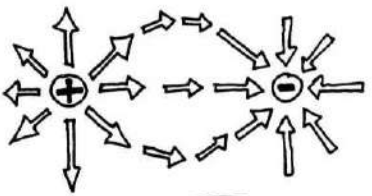
◊CAPÍTULO 23◊

EQUAÇÕES DE MAXWELL E LUZ (E OUTROS BARATOS)

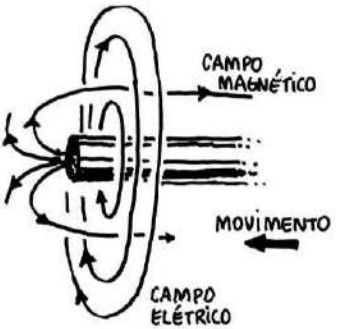
TECNICAMENTE FALANDO, OS CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS SÃO **CAMPOS VETORIAIS**, OU SEJA, CAMPOS COM INTENSIDADE E DIREÇÃO EM CADA PONTO DO ESPAÇO. PARA DESCREVER UM CAMPO VETORIAL É PRECISO DIZER COMO ELE SE DIFUNDE E CIRCULA (OU, EM TERMOS MAIS MATEMÁTICOS, COMO É SEU COMPORTAMENTO **DIVERGENTE E ROTACIONAL**).

EM 1873, JAMES CLERK **MAXWELL** ESCREVEU QUATRO EQUAÇÕES QUE ESPECIFICAM A DIVERGÊNCIA E A ROTAÇÃO DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO.

A PRIMEIRA EQUAÇÃO DE MAXWELL É A LEI DE GAUSS. ELA DIZ QUE AS LINHAS DE CAMPO ELÉTRICO **DIVERGEM** DAS CARGAS POSITIVAS E **CONVERGEM** PARA AS NEGATIVAS.

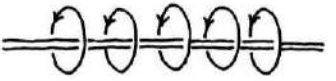


A SEGUNDA EQUAÇÃO É A LEI DE FARADAY: HÁ LINHAS DE CAMPO ELÉTRICAS **CIRCULANDO** EM TORNO DE CAMPOS MAGNÉTICOS VARIÁVEIS, OU SEJA, A VARIAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO INDUZ CAMPO ELÉTRICO.



A TERCEIRA EQUAÇÃO DIZ QUE CAMPOS MAGNÉTICOS NUNCA DIVERGEM OU CONVERGEM. ELES SEMPRE CONSTITUEM LINHAS FECHADAS.

FINALMENTE, A QUARTA EQUAÇÃO DIZ QUE HÁ LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICAS CIRCULANDO EM TORNO DE CORRENTES ELÉTRICAS, COMO NÓS JÁ VIMOS,



NO FIO RETILÍNEO E EM OUTROS. SÓ QUE MAXWELL TEVE UMA INSPIRAÇÃO NOTÁVEL...

MESMO SEM EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS, ELE PERCEBEU QUE A QUARTA LEI AINDA ESTAVA INCOMPLETA. EIS ALGO REALMENTE GENIAL!

SE NÓS LEMBRARMOS DA CORRENTE QUE ESTÁ CARREGANDO UM CAPACITOR, HAVERÁ ANÉIS DE CAMPO MAGNÉTICO EM TORNO DO FIO MAS... E NO ESPAÇO ENTRE AS PLACAS?

NÃO HAVERÁ CAMPO MAGNÉTICO AQUI?

SERÁ QUE O CAMPO NÃO CONTINUA NO ESPAÇO ENTRE AS PLACAS? MAXWELL DISSE:

POR UM LADO MAXWELL SENTIA QUE A NATUREZA NÃO GOSTA DE DESCONTINUIDADES. POR OUTRO ACHAVA QUE, ASSIM COMO CAMPOS MAGNÉTICOS VARIÁVEIS PODEM INDUZIR CAMPOS ELÉTRICOS, SIMETRICAMENTE CAMPOS ELÉTRICOS VARIÁVEIS PODERIAM PRODUZIR CAMPOS MAGNÉTICOS...

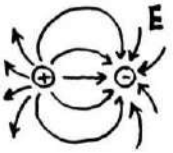
ASSIM, MAXWELL ACRESCENTOU UM TERMO EXTRA À SUA QUARTA EQUAÇÃO, DIZENDO QUE UM CAMPO MAGNÉTICO CIRCULA EM TORNO DOS CAMPOS ELÉTRICOS **VARIÁVEIS**. É O QUE ACONTECE ENTRE AS PLACAS AO SE CARREGAR O CONDENSADOR.

ANOS MAIS TARDE, ESSE CAMPO MAGNÉTICO FOI DETECTADO.

ASSIM, SEM MAIS DELONGAS, EIS AQUI AS

EQUAÇÕES DE MAXWELL

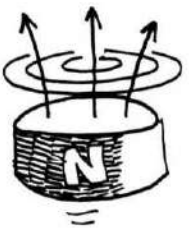
EM PLENO FORMALISMO MATEMÁTICO, QUE É LOGO PARA ASSUSTAR E INTIMIDAR VOCÊ!

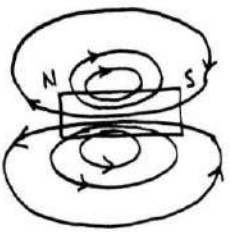


$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho$ (ONDE ρ, A LETRA GREGA RÔ, É A DENSIDADE DE CARGA; $\mathbf{E}$ É O CAMPO ELÉTRICO) DIZ QUE $\mathbf{E}$ SAI DAS CARGAS POSITIVAS E ENTRA EM CARGAS NEGATIVAS.

$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{d\mathbf{B}}{dt}$ { ONDE $\mathbf{C}$ = VELOCIDADE DA LUZ E $\mathbf{B}$ = CAMPO MAGNÉTICO }

DIZ QUE $\mathbf{E}$ CIRCULA EM TORNO DE $\mathbf{B}$ VARIÁVEL.

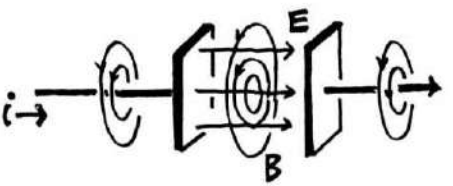




$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ DIZ QUE $\mathbf{B}$ NUNCA DIVERGE, SÓ FAZ CURVAS FECHADAS.

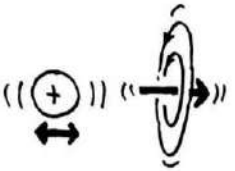
$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{J} + \frac{1}{c}\frac{d\mathbf{E}}{dt}$ { ONDE $\mathbf{J}$ É A DENSIDADE DE CORRENTE }

DIZ QUE $\mathbf{B}$ CIRCULA EM TORNO DE CORRENTES E DE CAMPOS $\mathbf{E}$ VARIÁVEIS



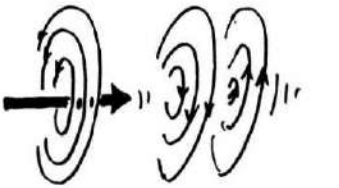
AQUELE ÚLTIMO TERMO ACRESCIDO À QUARTA EQUAÇÃO DE MAXWELL ACABOU POR RENDER UM DIVIDENDO SURPREENDENTE.

IMAGINE UMA CARGA ELÉTRICA SOLITÁRIA SENDO **VIBRADA**:



NO ESPAÇO, À VOLTA DELA ESTÁ HAVENDO MUDANÇA EM SEU CAMPO ELÉTRICO, INDUZINDO PORTANTO UM CAMPO MAGNÉTICO QUE CIRCULA À VOLTA.

MAS O CAMPO MAGNÉTICO TAMBÉM VARIA; PORTANTO, INDUZ MAIS CAMPO ELÉTRICO, QUE POR SUA VEZ...

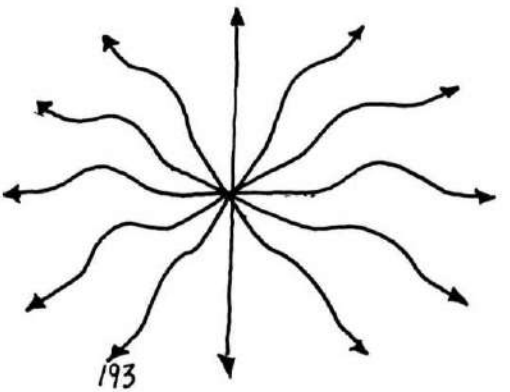


ETC.!

O RESULTADO É UMA

ONDA

DE CAMPOS QUE EMERGE DE UMA CARGA VIBRANTE, E COM A VELOCIDADE DA LUZ, DE ACORDO COM OS CÁLCULOS DE MAXWELL!



BAH!
MAXWELL FOI ILUMINADO PELA IDÉIA DE QUE A LUZ, A PRÓPRIA LUZ, FOSSE ELA MESMA UMA TAL ONDA ELETRO-MAGNÉTICA.
HERZ! DESCOBRI O RÁDIO!!
VOCÊ USOU AS MINHAS ONDAS, MARCONI. MAS SAI TUDO DO TERMO EXTRA DO MAXWELL!
SQUEET

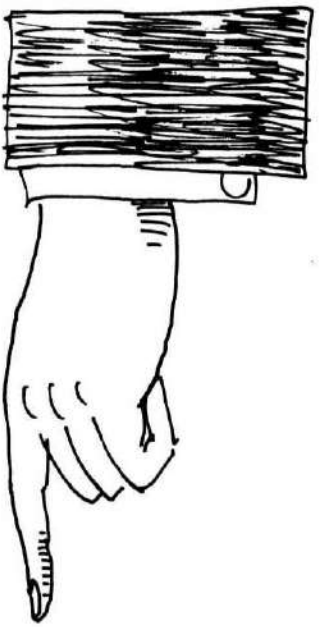
NÃO MUITO MAIS TARDE FOI SENDO DESCOBERTO UM AMPLO ESPECTRO DESSAS ONDAS, DESDE ONDAS DE RÁDIO ATÉ MICROONDAS, A INFRAVERMELHA, A LUZ VISÍVEL, A ULTRAVIOLETA RAIOS X E ATÉ RADIAÇÕES NUCLEARES GAMA. EM QUATRO EQUAÇÕES MAXWELL RESUMIU A ELETRICIDADE E O MAGNETISMO E, DE PASSAGEM, ABRANGENDO A LUZ E TODA A ÓPTICA... NADA MAL!

•CAPÍTULO 24•
ELETRODINÂMICA QUÂNTICA

JÁ VIMOS QUE A TEORIA DO ELETROMAGNETISMO CONTÉM A RELATIVIDADE, NATURALMENTE (V. PÁG. 176). QUANDO SE ADICIONA A ELA A MECÂNICA QUÂNTICA, ENTÃO ELA VIRA

ELETRO-DINÂMICA

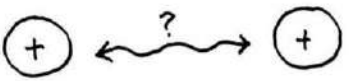
PRA COMEÇAR, A GENTE TEM QUE DIZER ALGO SOBRE A MECÂNICA QUÂNTICA, ESSE ESTRANHO SISTEMA QUE A FÍSICA AGORA USA PRA DESCREVER O MUNDO. ENTRE SUAS ESTRANHAS IDÉIAS, EIS ALGUMAS:



* A **LUZ** É FEITA DE PARTÍCULAS SEM MASSA CHAMADAS **FÓTONS**. TUDO BEM, JÁ QUE AS PARTÍCULAS TAMBÉM PODEM SE COMPORTAR COMO ONDAS.

* HÁ UMA "**INCERTEZA INTRÍNSECA**" NA NATUREZA QUE PROÍBE, POR EXEMPLO, ESPECIFICAR COMPLETAMENTE A POSIÇÃO E A QUANTIDADE DE MOVIMENTO DE UMA PARTÍCULA, AO MESMO TEMPO.

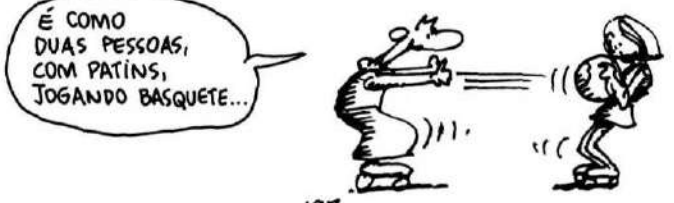
VOLTANDO AO PONTO ONDE DUAS CARGAS POSITIVAS SE REPELEM RECIPROCAMENTE, A GENTE QUERIA SABER COMO A FORÇA ELÉTRICA CRUZAVA O ESPAÇO...



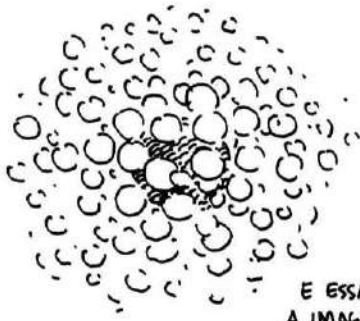
A ELETRODINÂMICA QUÂNTICA AFIRMA QUE ESTA FORÇA É CAUSADA POR PARTÍCULAS, **FÓTONS** ESPECIFICAMENTE. ESSES FÓTONS TÊM ENERGIA MAS NÃO TÊM MASSA E CRUZAM O ESPAÇO À VELOCIDADE DA LUZ.

PRA COMPLICAR, ELES NÃO SÃO FÓTONS "REAIS", COMO OS QUE A GENTE VÊ COM OS PRÓPRIOS OLHOS, MAS FÓTONS **VIRTUAIS**; UMA ESPÉCIE DE PARTÍCULA FANTASMA QUE VIOLA A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E EXISTE POR UM TEMPO MUITO CURTO.

SE A GENTE FIZER UMA ANALOGIA CLÁSSICA DE UMA COISA QUE É ESSENCIALMENTE QUÂNTICA...



E OS TAIS DE FÓTONS VIRTUAIS? MESMO UMA CARGA ISOLADA ESTÁ O TEMPO TODO CRIANDO, EMITINDO E ABSORVENDO FÓTONS VIRTUAIS.



E ESSA É (QUASE) TODA A IMAGEM DA ELETRODINÂMICA QUÂNTICA.

CARGA É PORTANTO A CAPACIDADE DE CRIAR FÓTONS VIRTUAIS!

* * * * * * * * *
E CAMPO ELÉTRICO
É NADA MAIS QUE UMA NUVEM DE FÓTONS VIRTUAIS!
* * * * * * * * *

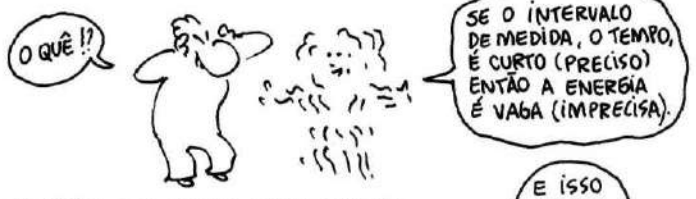
O MAIS ESTRANHO NISSO TUDO É QUE OS FÓTONS VIRTUAIS SÃO FEITOS DE NADA. DEPOIS QUE ELES SÃO CRIADOS, HÁ MAIS ENERGIA NO TOTAL DO QUE ANTES, POIS A PARTÍCULA QUE OS CRIOU CONTINUA COMO SUA ENERGIA ORIGINAL...

AÍ VOCÊ PODE COMEÇAR A LEVAR A SÉRIO A TAL DA "INCERTEZA" QUÂNTICA...

UMA FORMA DO

PRINCÍPIO DA INCERTEZA

É A SEGUINTE: NÃO SE PODE TER UMA DETERMINAÇÃO EXATA DO TEMPO E DA ENERGIA AO MESMO TEMPO.



ISSO SIGNIFICA QUE O BALANÇO DA ENERGIA PODE "FICAR NO VERMELHO", COM SALDO NEGATIVO GRANDE NUM CURTO INTERVALO DE TEMPO OU COM SALDO NEGATIVO PEQUENO POR UM TEMPO MAIOR. (MATEMATICAMENTE $\Delta E \cdot \Delta t \geqslant h$: A INCERTEZA NO SALDO ENERGÉTICO VEZES O INTERVALO DE TEMPO NÃO PODE SUPERAR CERTO VALOR h*)

***N. do T.:** h É A CHAMADA CONSTANTE DE PLANCK, DEVIDO AO FÍSICO ALEMÃO MAX PLANCK.

NOUTRAS PALAVRAS, UM FÓTON VIRTUAL MUITO ENERGÉTICO TEM DE SER RECAPTURADO RAPIDAMENTE PARA RECOMPOR O BALANÇO ENERGÉTICO; PORTANTO, NÃO PODE IR MUITO LONGE MESMO À VELOCIDADE DA LUZ...

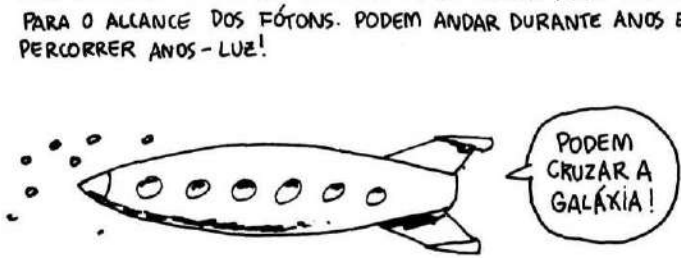
AO PASSO QUE UM DE BAIXA ENERGIA PODE IR LONGE.

POIS UMA PEQUENA VIOLAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA PODE SER TOLERADA POR MAIS TEMPO.

ISSO EXPLICA POR QUE A FORÇA ELÉTRICA

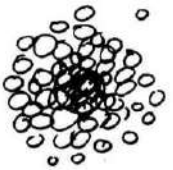
DIMINUE COM A DISTÂNCIA!

FÓTONS CAPAZES DE DAR UM BOM EMPURRÃO NÃO PODEM IR MUITO LONGE COM SUA ENERGIA. FEITAS AS CONTAS, A GENTE CHEGA À VELHA LEI DO INVERSO DOS QUADRADOS DA DISTÂNCIA DA FÍSICA CLÁSSICA. COMO NÃO HÁ LIMITE INFERIOR PARA UM FÓTON VIRTUAL, NÃO HÁ LIMITE PARA O ALCANCE DOS FÓTONS. PODEM ANDAR DURANTE ANOS E PERCORRER ANOS-LUZ!

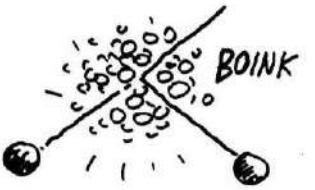


ESPERA AÍ!!
ESSA TEORIA DIZ QUE CAMPOS ELÉTRICOS SÃO NUVENS DE FÓTONS VIRTUAIS, QUE NEM SÃO "REAIS". E TODOS ESSES FANTASMAS SÓ EXPLICAM AQUILO QUE A GENTE JÁ SABIA...
PRA QUE DIABOS
ELES SERVEM?
E QUEM DISSE QUE ELES REALMENTE "ESTÃO LÁ"...?

EXISTE UM JEITO DE TORNAR REAIS OS FÓTONS VIRTUAIS. TOMEMOS UMA CARGA COM SUA NUVEM DE FÓTONS VIRTUAIS...

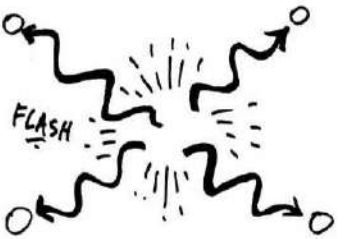


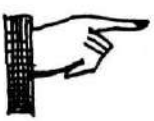
...E SUPONHAMOS QUE NÓS "TIREMOS" A CARGA DE DENTRO DA NUVEM ATINGINDO-A COM OUTRA PARTÍCULA.



OS FÓTONS VIRTUAIS FICAM ÓRFÃOS, SEM A CARGA QUE POSSA REABSORVÊ-LOS!

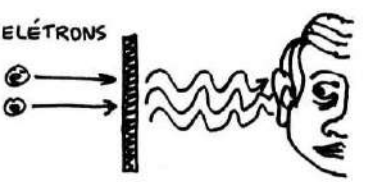
E POR ISSO ELES ESCAPAM, USANDO PARTE DA ENERGIA DA COLISÃO.





SE A GENTE CHACOALHAR UMA CARGA, DEVERIAM SURGIR FÓTONS REAIS NO PROCESSO...

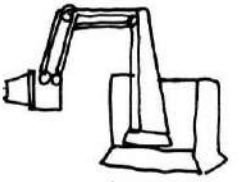
POIS É ASSIM QUE SE PRODUZEM RAIOS X. ELÉTRONS SÃO ATIRADOS CONTRA UM METAL PESADO QUE OS FREIA. SEUS FÓTONS VIRTUAIS SAEM COMO RAIOS X REAIS!

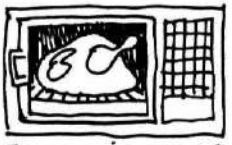


CLARO QUE FÓTONS NÃO PRECISAM SER RAIOS X. UM RADIOTRANSMISSOR CHACOALHA ELÉTRONS, QUE ESPALHA FÓTONS QUE SEU RECEPTOR CAPTA. NO FILAMENTO DA LÂMPADA, ELÉTRONS SOLTAM FÓTONS DE LUZ VISÍVEL. E, COMO VIMOS NA TEORIA CLÁSSICA, SEMPRE QUE UMA CARGA É ACELERADA, UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA — FÓTONS VIRTUAIS "REALIZADOS" — É IRRADIADA. A MAIOR PARTE DE NOSSAS HABITUAIS FONTES DE RADIAÇÃO RETIRA SEUS FÓTONS DE SUAS NUVENS VIRTUAIS.

FOGO

VAGA-LUME

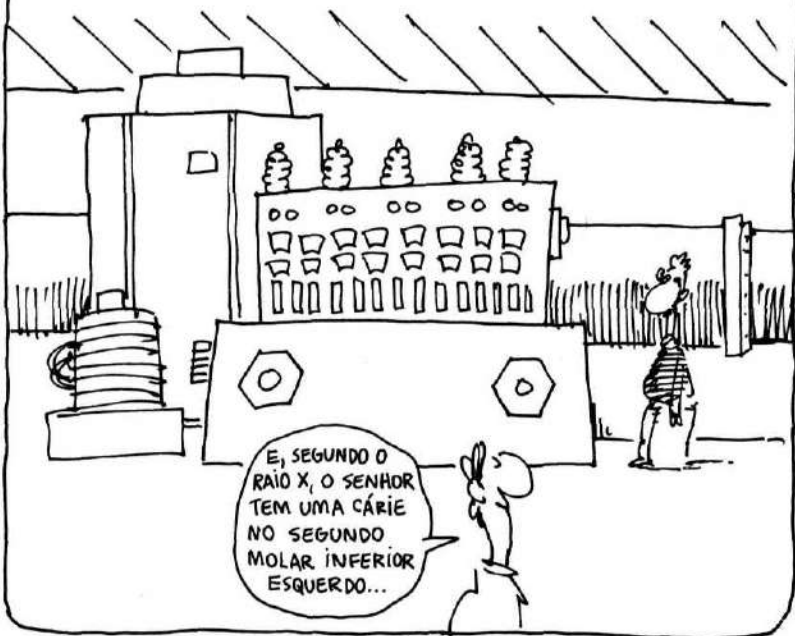

RAIO X


FORNO MICROONDAS

BOMBA ATÔMICA

SE A TEORIA QUÂNTICA SÓ DESCREVESSE O QUE JÁ SE SABE, NÃO TERIA MESMO MUITA GRAÇA. MAS ELA PREVÊ TAMBÉM NOVOS FENÔMENOS.

BEM... POR EXEMPLO, PREVENDO PEQUENAS DISCREPÂNCIAS DA TEORIA CLÁSSICA, COMO VARIAÇÃO A CURTAS DISTÂNCIAS DA LEI DO INVERSO DOS QUADRADOS, DIFERENÇAS NO CAMPO MAGNÉTICO DE ELÉTRONS, ETC. ESSES EFEITOS FORAM CONFIRMADOS EM EXPERIÊNCIAS DELICADAS QUE NOS ASSEGURAM QUE AGORA TEMOS A TEORIA CORRETA DA FORÇA ELETROMAGNÉTICA.



A IDÉIA GERAL DE FORÇAS SENDO TRANSPORTADAS POR "PARTÍCULAS DE INTERAÇÃO", COMO OS FÓTONS, FOI AMPLAMENTE ESTENDIDA NA FÍSICA:

A FORÇA NUCLEAR **FORTE**, QUE LIGA PRÓTONS DENTRO DO NÚCLEO, É EXPLICADA PELA TROCA DE PARTÍCULAS CHAMADAS ***MÉSONS***. A FORÇA NUCLEAR **FRACA** FOI REVELADA COMO DA MESMA NATUREZA DA FORÇA ELETROMAGNÉTICA, AO SE PROPOR E ACHAR "IRMÃOS" DO FÓTON RESPONSÁVEIS POR SUA TRANSMISSÃO.

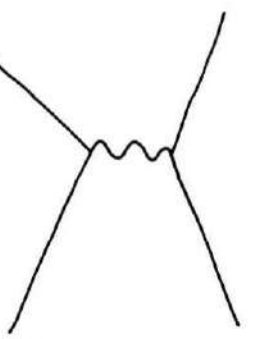
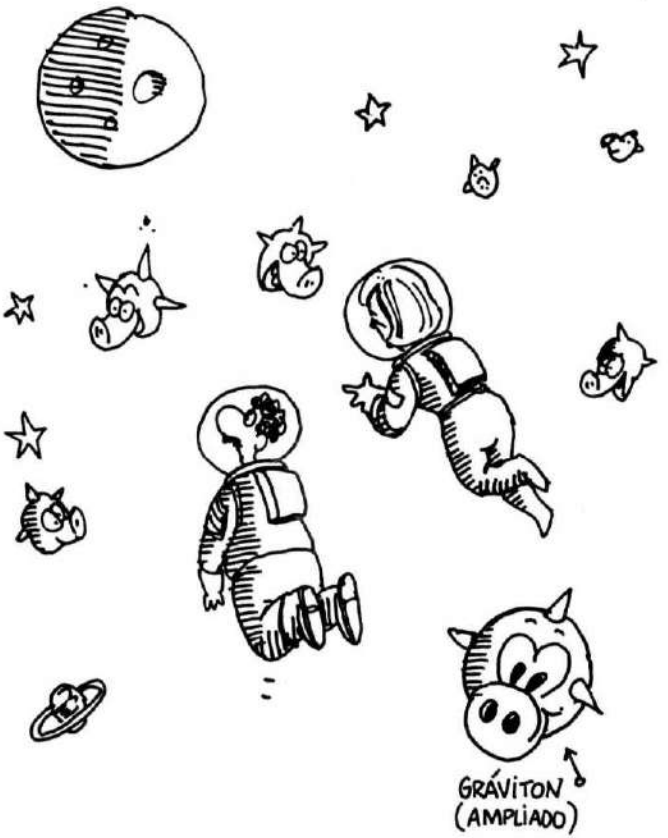


DIAGRAMA DE FEYNMAN GENÉRICO PARA A TROCA DE PARTÍCULA.

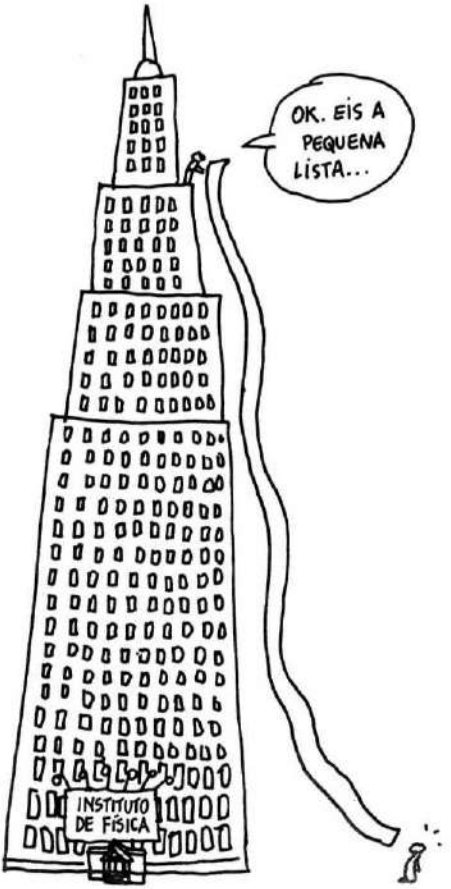
A FORÇA ENTRE OS QUARKS, QUE CONSTITUEM OS NÊUTRONS E PRÓTONS, TAMBÉM É ATRIBUÍDA AO INTERCÂMBIO DE PARTÍCULAS CHAMADAS ***GLÚONS***.

E A GRAVIDADE...?

POIS BEM... A GRAVIDADE DEVE OPERAR PELA TROCA DE **GRÁVITONS**... MAS A GENTE NÃO TEM ESPERANÇA DE OBSERVAR UM "BICHO" DESSES TÃO CEDO. A FORÇA É MUITO DÉBIL; SÓ CORPOS DE DIMENSÕES ASTRONÔMICAS EXERCEM ATRAÇÃO SIGNIFICATIVA, MAS A GENTE ACREDITA QUE SÃO OS GRÁVITONS OS RESPONSÁVEIS POR ELA.



OS FÍSICOS AINDA ACREDITAM QUE TODAS AS FORÇAS DA NATUREZA RESULTAM NO INTERCÂMBIO DE PARTÍCULAS. RELACIONANDO ESSAS PARTÍCULAS, ESPERAMOS DESENVOLVER UMA IMAGEM UNIFICADA DE TODAS AS FORÇAS COM UMA PEQUENA LISTA DE REGRAS QUE SERIA SUFICIENTE PARA DESCREVER PRATICAMENTE... **TUDO!**



SOBRE OS AUTORES

ART HUFFMAN DIRIGE UM PROGRAMA DE CONFERÊNCIAS DE FÍSICA NA UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA (SETOR LOS ANGELES/ UCLA). ELE TAMBÉM LECIONA FÍSICA E ASTRONOMIA, TRABALHA COMO GUIA DE EXCURSÕES DE OBSERVAÇÃO DO CÉU E FAZ ALPINISMO, PILOTA AVIÕES E FAZ LONGAS CAMINHADAS. DOUTOROU-SE NA UNIVERSIDADE DE WASHINGTON. PUBLICOU VINTE TRABALHOS EM FÍSICA NUCLEAR TEÓRICA E ASTROFÍSICA. É CASADO E TEM DOIS FILHOS, ANDRÔMEDA E TARAN.

LARRY GONICK É AUTOR OU CO-AUTOR DE VÁRIOS LIVROS DE NÃO-FICÇÃO EM CARTOONS. PRODUZ A PUBLICAÇÃO BIMENSAL "SCIENCE CLASSICS", NA REVISTA "DISCOVER". SOFREU MUITO COM FÍSICA NA ESCOLA (MAIS QUE COM A PRIMEIRA NAMORADA) E É GRATO A HUFFMAN POR TER TIDO UMA CHANCE DE ENTENDER A COISA. MORA EM S. FRANCISCO, CALIFÓRNIA, COM MULHER E DOIS FILHOS.

ÍNDICE

AC, VEJA CORRENTE
ACELERAÇÃO, 7 A 13
  ANGULAR, 90
ACELERADOR DE PARTÍCULA, 155
ACELERÔMETRO, 10
ALAVANCA, PRINCÍPIO DA, 92 E 93
AMPERÍMETRO, 138
AMPÈRE, ANDRÉ-MARIE, 157
AMPÈRES, 130
ARMAS, RECUO DE, 68 E 69
ARISTÓTELES, 18 E 19
ATRITO, 51 E 52
  DO AR, 58
  CINÉTICO, 57
  ESTÁTICO, 57
  FORÇA DE, 20
  TIPOS DE, 57
ATÔMICA, FORÇA, 62
AUTO-INDUTÂNCIA, 178

BATERIA, 128 E 129
"BIG BANG", 46 E 82
BILHAR, 89
BÚSSOLA, 150

CA, VEJA CORRENTE
CABO DE GUERRA, 55 E 56
CALOR, COMO ENERGIA, 80 E 81
  ENERGIA CINÉTICA E, 85
  ÍMÃS E, 163
CAMPO
  CAPACITORES E, 126
  ELÉTRICO, 117 A 122
  ELETROMAGNÉTICO, 189 A 191
  GRAVITACIONAL, 117 E 118
  INDUTORES E, 178
  MAGNÉTICO, 149 A 163
  VETORIAL, 189 A 191
CAPACITORES, 123 A 127
  CORRENTE ALTERNADA E, 182 A 184
CARGA ELÉTRICA, 105 A 116 E 198
CC, VEJA CORRENTE
CENTRÍFUGA, FORÇA, 60, 61 E 63
CENTRÍPETA, FORÇA, 60, 61 E 155
CIRCUITO PARALELO, 145 E 146
CIRCUITO SÉRIE, 142 A 144 E 147 A 148
CIRCULAÇÃO EM CAMPOS VETORIAIS, 189 A 191
COLISÕES, 84 A 89
  QUANTIDADE DE MOVIMENTO E, 68 E 70
CONDUTORES, 110 E 132 A 133
  VER TAMBÉM SUPERCONDUTORES
CONSERVAÇÃO
  DA ENERGIA, 79 A 80
  DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO, 68 A 72
  DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO ANGULAR, 95
CORRENTE, 130 A 141
  ALTERNADA, 180 A 188
COULOMB, CHARLES, 111
  LEI DE, 111
COULOMB (UNIDADE DE CARGA), 121

DC, VEJA CORRENTE
DESACELERAÇÃO, 9 E 10
DIVERGENTE, 189 E 190
DOMÍNIOS MAGNÉTICOS, 162 E 163

EINSTEIN, ALBERT, 15, 41 E 169
ELASTICIDADE, 84 E 85
  COLISÕES E, 88 E 89
ELETRICIDADE, 105 A 116
  MAGNETISMO E, 152 A 159
ELETRODINÂMICA QUÂNTICA, 196 A 207
ELETRÓFORO, 115 E 116
ELETROÍMÃ, 159
ELETROMAGNÉTICA-FORÇA BÁSICA-, 62
ELETROMAGNETO, VEJA ELETROÍMÃ
ELETROMOTRIZ, FORÇA, 165 E 166
ELÉTRON VOLT (eV), 127
ELÉTRONS, 107 E 109
ELETROSTÁTICA, FORÇA, 111 E 112

ELIPSES, 44 E 45
ENERGIA, 73 A 82
  CARGA ELÉTRICA E, 120 E 121
  CINÉTICA, 77 E 78
  CALOR COMO, 80 E 81
  CONSERVAÇÃO DA, 79 E 80
  COLISÕES E, 88 E 89
  MÚSCULOS E, 82
  POTENCIAL, 77 E 78
  RADIANTE, 82
  QUÍMICA, 82
  SOM COMO, 80
  WATTS E, 140 E 141
ESTRELA, COLAPSO DE, 95
EXPLOSÕES, 68 E 70

FARADAY, MICHAEL, 124, 164 E 165
  INDUÇÃO DE, 164 A 168
  LEI DE, 190
FARADS, 124
FERROMAGNETISMO, 161
FEYNMAN, DIAGRAMA DE, 205
"FLASH", 126
FORÇA
  ATÔMICA, 62
  DE ATRITO, 20
  BÁSICA, 62
  CENTRÍFUGA, 60, 61 E 63
  CENTRÍPETA, 60, 61 E 155
  ELÉTRICA, 108
  ELETROMAGNÉTICA, 62
  ELETROMOTRIZ, 165 E 166
  ELETROSTÁTICA, 111 E 112
  FICTÍCIA, 59 A 61
  GRAVITACIONAL, 62
  INTERNA, 70
  MOVIMENTO E, 18 A 21
  NUCLEAR FORTE, 62
  PESO, 50 A 52
  SUBATÔMICA FRACA, 62
  TRABALHO E, 74
  VETORES E, 52 E 53
FÓTONS, 196 A 198 E 205
FOTOSSÍNTESE, 82
FRANKLIN, BENJAMIN, 107
FREIO MAGNÉTICO, 168
FUSÃO NUCLEAR, 82

GALILEU GALILEI, 14, 15, 17, E 19 A 21
GALVANÔMETRO, 165
GAMA, RAIOS, 114, 194
GAUSS, LEI DE, 190
GLÚONS, 205
GRAVIDADE, 24 A 29
  ACELERAÇÃO DA, 12 A 17
  ARTIFICIAL, 63
  FORÇA DE, 62, 11 E 112
  LEI DA, 26 E 27
  MARÉS E, 28 E 29
  PESO E, 30 E 31
GRAVITACIONAL,
  CAMPO, 117 E 118
  POTENCIAL, 121
GRÁVITONS, 106

HIDROELETRICIDADE, 167
HIPÉRBOLE, 44

ÍMÃ, VEJA TAMBÉM ELETROÍMÃ
  CALOR E, 163
  PERMANENTE, 160 A 163
IMPULSO, QUANTIDADE DE
  MOVIMENTO E, 64 A 67
INCERTEZA, PRINCÍPIO DA, 199 E 200
INDUÇÃO, 164 A 168
INDUTORES, 177 A 179
  CORRENTE CONTÍNUA E, 182
INÉRCIA, 22
  FORÇAS FICTÍCIAS E, 59 A 60
  ROTACIONAL, 90 A 92 E 94 A 95
INFRAVERMELHO, 194
ÍON, 107
ISOLANTES ELÉTRICOS, 110

JOULES, 76 E 121
  ELÉTRON VOLTS E, 127
  WATTS E, 140 A 141
JUNÇÕES, TEOREMA DAS, 146

KEPLER, JOHANNES, 45
KIRCHHOFF,
  1.A LEI DE, 144
  2.A LEI DE, 146

LEIS DE
  COULOMB, 111
  FARADAY, 190
  GAUSS, 190

KIRCHHOFF, 144 E 146
LENZ, 168 E 178
NEWTON, 21 A 25, 53, 64 E 73
OHM, 131 E 145 A 147
LENZ, LEI DE, 168 E 178
LUZ, TEORIA ONDULATÓRIA, 193 E 194

MAGNÉSIA, 149
MAGNETOS, VEJA ÍMÃS
MARÉS, 28 E 29
MASSA,
INÉRCIA E, 22 E 91
PESO E, 30 A 32
MAXWELL, JAMES CLERK, 189
EQUAÇÕES DE, 189 A 194
MÉSONS, 205
MICROONDAS, 194 E 203
MOMENTO DE INÉRCIA, 90 A 92
MOVIMENTO, 3 A 13
FORÇA E, 18 A 21
ROTACIONAL, 90 A 99
DE SATÉLITES, 37 A 41
MULTÍMETRO, 137

NÊUTRONS, 107 E 205
NEWTON, ISAAC, 21 E 73
NEWTON (UNIDADE DE FORÇA), 32

OERSTED, HANS, 152, 156 E 164
OHM, GEORGE, 131
OHM (UNIDADE DE RESISTÊNCIA), 132
ONDA ELETROMAGNÉTICA, 193 A 194
INFRAVERMELHO, 194
DE RÁDIO, 184 E 194
ULTRAVIOLETA, 194
ÓRBITAS, 36 A 46
TIPOS DE, 44

PARÁBOLAS, 44
PÁRA-QUEDAS 58 E 67
PESO, FORÇA E, 50 A 52
GRAVIDADE E, 30 A 32
POLARIZAÇÃO ELÉTRICA, 108
PÓLOS MAGNÉTICOS, 150 E 151
PÓSITRON, 114
POTENCIAL,
ELÉTRICO, 121
GRAVITACIONAL, 121
PRECESSÃO, 96, 97 E 99
PRINCÍPIO DA INCERTEZA, 199 A 200
PROJÉTEIS, 33 A 36
PRÓTONS, 107 E 205

QUANTIDADE DE MOVIMENTO
ANGULAR E TORQUE, 92 A 99
LINEAR E IMPULSO, 64 A 72
QUARKS, 205
QUEDA LIVRE, 14 A 18

RADIOTRANSMISSOR, 203
RAIOS GAMA, 114 E 194
RAIOS X, 194, 202 E 203
REGRA DA MÃO DIREITA, 157
RELATIVIDADE, TEORIA DA, 127 E 170 A 176
RESISTÊNCIA ELÉTRICA, 132, 139 E 145
RESISTIVIDADE, 133
ROTAÇÕES, 90 A 99
ROTOR, 61

SATÉLITES, 37 A 41
SOLENÓIDE, 158
SOM, COMO ENERGIA, 80
SUPERCONDUTORES, 134, 135 E 188

TEMPERATURA, VEJA CALOR
TENSÃO (ELÉTRICA), VEJA VOLTAGEM
TERMODINÂMICA, 81
TERRA (ELÉTRICO), 116
TORQUE, 93, 95 E 98
TRABALHO, 74
ENERGIA E, 76
NO CAMPO ELÉTRICO, 120
TRANSFORMADORES, 186 A 188

ULTRAVIOLETA, 194

VELOCIDADE 4 A 6
ANGULAR, 94
CÍRCULOS E, 11
EQUAÇÃO DA, 12
LINEAR, 4 A 6
VELOCÍMETRO, 5 A 7
VOLT, 121, 140 E 141
VOLTA, ALESSANDRO, 115, 128 E 129
VOLTAGEM,
MEDIDA DE, 137
QUEDA DE, 137 E 143
X, RAIOS, 194, 202 E 203